



Vlaanderen
is wetenschap



00_031_31
WL rapporten

Overleg flexibel storten

Deelrapport 31
Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van
de diepe put van Hansweert

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Overleg Flexibel Storten

Deelrapport 31 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert

Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2019
D/2019/3241/118

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F. (2019). Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 31 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. WL Rapporten, 00_031_31. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Maritieme Toegang	Ref.:	WL2019R00_031_31
Keywords (3-5):	Stroming, sediment, monitoring, Westerschelde		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	4
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Plancke, Y.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire, D.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2019-10-11 14:41:11 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Dieter Meire</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2019-10-22 15:55:49 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-10-22 21:00:38 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

Ten behoeve van de invulling van de toekomstige stortstrategie in de Westerschelde is het van groot belang in te kunnen schatten hoe snel en hoeveel de gestorte specie zal getransporteerd worden. Door het Waterbouwkundig Laboratorium werden hiervoor stromings- en sedimenttransportmetingen uitgevoerd nabij de Platen van Ossensisse, in de onmiddellijke omgeving van de verschillende (proef)stortlocaties (SH41, SH51, diepe put van Hansweert).

Gedurende 2 dagen (28 en 29 augustus 2018) werd met verschillende directe en indirecte meettechnieken gedurende een volledig getij gemeten langs de westrand en de oostrand van het platencomplex. Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van de meetcampagne, zowel inzake stroming als sedimenttransport. De vergelijking met sedimenttransporten bepaald op basis van de migratie van bodemvormen, leert dat er een groot verschil is tussen beide transporten. Dit is van belang met oog op het inschatten van de dynamiek (zowel grootte van sedimenttransport als afgelegde weg tijdens getijcyclus van getransporteerd sediment) van gestorte specie, die grotendeels als (nabij-)bodemtransport zal optreden en minder als suspensie transport.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Beschrijving meetcampagne	2
2.1 Prelude.....	2
2.2 Meetlocaties.....	3
2.3 Meettechnieken	5
2.3.1 Waterstanden.....	5
2.3.2 Wind	5
2.3.3 Stroming	5
2.3.4 Sedimenttransport	6
2.3.5 Sedimentconcentratie	8
2.3.6 Korrelgrootte	9
2.3.7 Overige parameters.....	9
2.4 Verwerking indirecte meettechnieken.....	10
2.4.1 Sedimentconcentratie op basis van optische signalen	10
2.4.2 Sedimentconcentratie op basis van akoestische backscatter	10
3 Resultaten dag 1 (28/08/2018)	12
3.1 Waterstanden.....	12
3.2 Delftse fles	13
3.3 LISST-100	14
3.3.1 Kalibratie.....	14
3.3.2 Sedimentconcentratie	16
3.4 ADCP	18
3.4.1 Stroming	18
3.4.2 Kalibratie.....	19
3.4.3 Sedimentconcentratie	20
4 Resultaten dag 2 (29/08/2018)	22
4.1 Waterstanden.....	22

4.2	Delftse fles	23
4.3	Aanderaa Seaguard 2500	24
4.3.1	Stroming	24
4.3.2	Kalibratie.....	24
4.3.3	Sedimentconcentratie	24
4.4	LISST-100	27
4.4.1	Sedimentconcentratie	27
4.5	ADCP	30
4.5.1	Stroming	30
4.5.2	Sedimentconcentratie	31
5	Totaal sedimenttransport.....	33
5.1	Methodologie	33
5.2	Resultaten.....	34
6	Duinmigratie	36
6.1	Methodologie	37
6.2	Resultaten.....	38
7	Discussie	40
7.1	Sedimenttransport	40
7.2	Sedimentverplaatsing.....	43
8	Conclusies en aanbevelingen	45
8.1	Conclusies.....	45
8.2	Aanbevelingen.....	45
9	Referenties	46
	Bijlage – Bodemvormen	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht karakteristieken ADCP	6
Tabel 2 – Overzicht netto en bruto sedimenttransport	41
Tabel 3 – Inschatting afgelegd weg sedimentdeeltjes	43

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht studiegebied en ligging profielen bodemvorm-analyse.....	2
Figuur 2 – Overzicht afgeleide bodemtransporten per profiel	3
Figuur 3 – Overzicht meetlocaties, duinprofielen uit Plancke <i>et al.</i> (2018) en MBES-zones opgemeten door RWS	4
Figuur 4 – Delftse fles op frame (links) en detail Aanderaa Sueguard (rechts) gemonteerd op staart frame..	7
Figuur 5 – Opgehangen Delftse fles.....	7
Figuur 6 – Meetframe (links) en detail (rechts) meettoestellen: LISST-100X en Sontek-Vector.....	8
Figuur 7 – Verloop waterstand, stijgsnelheid en verhang meetdag 1 (28/08/2018).....	12
Figuur 8 – Verloop sedimenttransport en D50 op basis van Delftse fles tijdens meetdag 1 (28/08/2018) ...	13
Figuur 9 – Relatie tussen volumeconcentratie LISST-100 en SSC pompstalen op beide meetdagen	15
Figuur 10 – Verloop verhouding massa- tot volumeconcentratie en D50 uit opgehangen Delftse fles op beide meetdagen.....	15
Figuur 11 – Verloop sedimentconcentratie en druk (boven) en D50 (onder) op basis van LISST-100 tijdens meetdag 1 (28/08/2018)	16
Figuur 12 – Korrelverdeling op basis van LISST-100 voor verschillende momenten tijdens meetdag 1 (28/08/2018)	17
Figuur 13 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid op meetdag 1 (28/08/2018).....	18
Figuur 14 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid uit varende meting op meetdag 1 (28/08/2018)..	19
Figuur 15 – Relatie tussen gecorrigeerde ABS (ADCP) en SSC pompstalen op beide meetdagen	20
Figuur 16 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op meetdag 1 (28/08/2018).....	21
Figuur 17 – Verloop waterstand, stijgsnelheid en verhang meetdag 2 (29/08/2018).....	22
Figuur 18 – Verloop sedimenttransport en D50 op basis van Delftse fles tijdens meetdag 2 (29/08/2018) .	23
Figuur 19 – Verloop stroomsnelheden (boven) en druk Aanderaa (onder) tijdens meetdag 2 (29/08/2018)	25
Figuur 20 – Relatie turbiditeit en sedimentconcentratie Aanderaa tijdens meetdag 2 (29/08/2018).....	26
Figuur 21 – Verloop sedimentconcentratie Aanderaa tijdens meetdag 2 (29/08/2018).....	26
Figuur 22 – Verloop sedimentconcentratie en druk (boven) en D50 (onder) op basis van LISST-100 tijdens meetdag 2 (29/08/2018)	28
Figuur 23 – Korrelverdeling op basis van LISST-100 voor verschillende momenten tijdens meetdag 2 (29/08/2018)	29
Figuur 24 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid op meetdag 1 (28/08/2018).....	30
Figuur 25 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid uit varende meting op meetdag 1 (28/08/2018)..	31
Figuur 26 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op meetdag 2 (29/08/2018).....	32
Figuur 27 – Relatief verloop sedimenttransport over de verticale	34

Figuur 28 – Verloop diepte-geïntegreerd sedimenttransport op meetdag 1 (28/08/2018).....	35
Figuur 29 – Verloop diepte-geïntegreerd sedimenttransport op meetdag 2 (29/08/2018).....	35
Figuur 30 –Ligging meetraaien MBES: Raai 1 (zuidelijk) en raai 2 (noordelijk, met afstand langsprofiel).....	36
Figuur 31 – Overzicht parameters gebruikt voor het berekenen van het bodemtransport	37
Figuur 32 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen 2 opeenvolgende getijfasen.....	38
Figuur 33 –Afgeleid sedimenttransport op raai 2 (per deelraai van 250 m) o.b.v. volumeverschillen duinen	39
Figuur 34 – Overzicht meetlocaties meetcampagne 2016 (i.s.m. RWS)	41
Figuur 35 – Verloop sedimenttransport meetcampagne 2016 (deel DT-ST-cyclus)	42
Figuur 36 – Verloop sedimenttransport meetcampagne 2016 (1 getijcyclus).....	42
Figuur 37 - Verschillende vormen van sedimenttransport.....	44
Figuur 38 – Migratie bodemvormen (1 getijcyclus)	44
Figuur 39 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B1
Figuur 40 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B2
Figuur 41 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B2
Figuur 42 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B3
Figuur 43 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B3
Figuur 44 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B4
Figuur 45 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)	B4

1 Inleiding

In het kader van de verruiming van de vaargeul in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde werd een stortstrategie ontwikkeld waarbij de onderhoudsspecie deels in de hoofdgeulen, deels in de nevengeulen en deels langs een aantal plaatranden wordt teruggestort. Deze strategie werd ook na het aflopen van de vergunningstermijn van 5 jaar verdergezet in de vigerende vergunning.

Ter voorbereiding van de toekomstige stortstrategie werd, na voorbereidend onderzoek (Arcadis, 2015), in 2016 een vergunning verkregen voor het uitvoeren van proefstortingen (maximaal 2 campagnes met storthoeveelheid van maximaal 1 Mm³ per campagne) in de Westerschelde, waaronder 2 locaties in de diepe delen van de vaargeul (Inloop Ossensisse en Diepe put Hansweert). Deze proefstortingen werden opgevolgd met multibeam echo-sounder (MBES) peilingen, met als doel de stabiliteit van de gestorte specie op te kunnen volgen. Uit deze resultaten bleek dat de stabiliteit eerder beperkt was, zowel initieel (tijdens en vlak de stortingen) als op de langere (~ 1 jaar) termijn. Om een beter inzicht te krijgen in de sedimentverspreiding, werden aanvullende acties ondernomen:

1. Inschatten van de sedimentverspreiding tijdens het storten aan de hand van een meetcampagne tijdens de 2^e proefstortcampagne (juli 2017) (Plancke *et al.*, 2017)
2. Inschatten van het sedimenttransport in en nabij de diepe put van Hansweert.
3. Herhaling van de proefstortingen om op basis van aanvullende metingen een beter inzicht te krijgen van de sedimentverspreiding. Hiervoor werd in de eerste helft van 2019 een nieuwe vergunning bekomen en zullen in de loop van 2019 en 2020 nieuwe proefstortingen (telkens 1 Mm³) georganiseerd worden.

Voorliggend rapport gaat in op de tweede actie uit bovenstaande lijst. Op twee locaties nabij de diepe put van Hansweert is gedurende een volledige getijcyclus de stroming en het sedimenttransport gemeten. Gelijktijdig is door Rijkswaterstaat een meting uitgevoerd waarbij zowel op één punt als één langsraai de stroming en het sedimenttransport is gemeten.

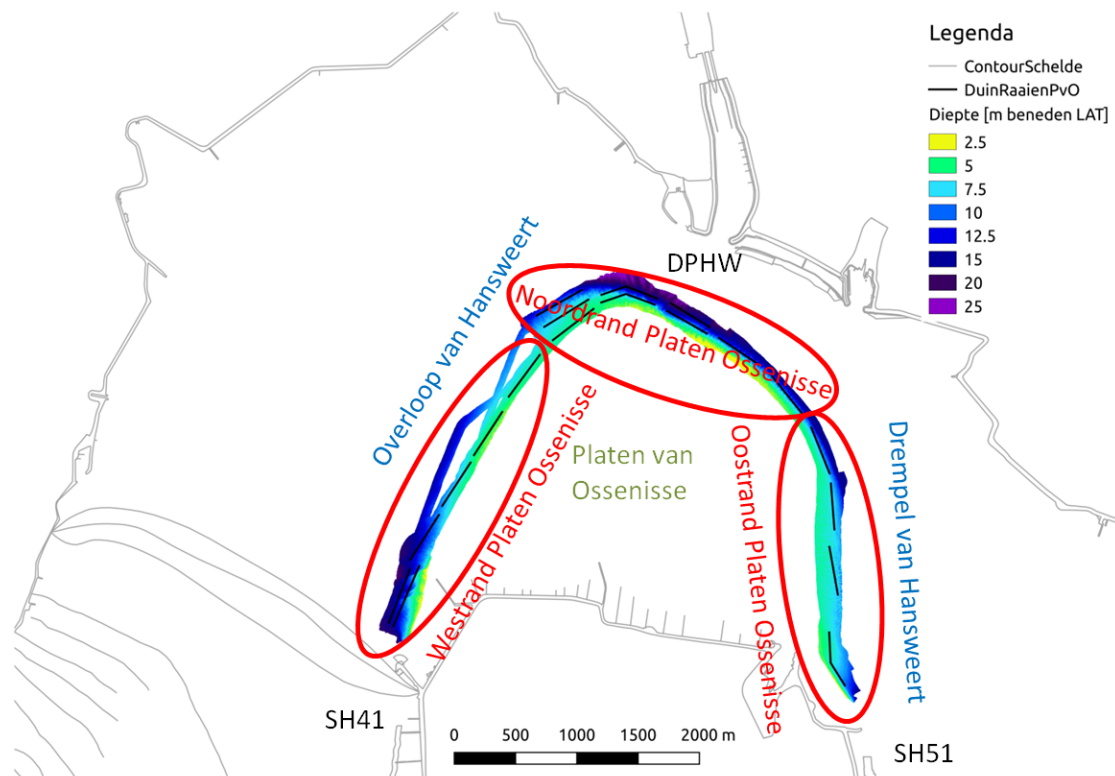
Bij het uitvoeren van terreinmetingen zijn verschillende partijen betrokken die niet op de voorgrond verschijnen. Vandaar een woord van dank aan zij die hebben meegewerkt aan het tot stand komen van deze meetcampagne: Erwin De Backer en Styn Claeys voor de mobilisatie van het meetschip, de bemanningen van de MS Pierre Petit voor het uitvoeren van de meting, Sven Smolders en verschillende andere collega's voor de assistentie bij de uitvoering van de metingen en de dames van het sedimentologisch laboratorium voor het analyseren van de genomen stalen.

2 Beschrijving meetcampagne

2.1 Prelude

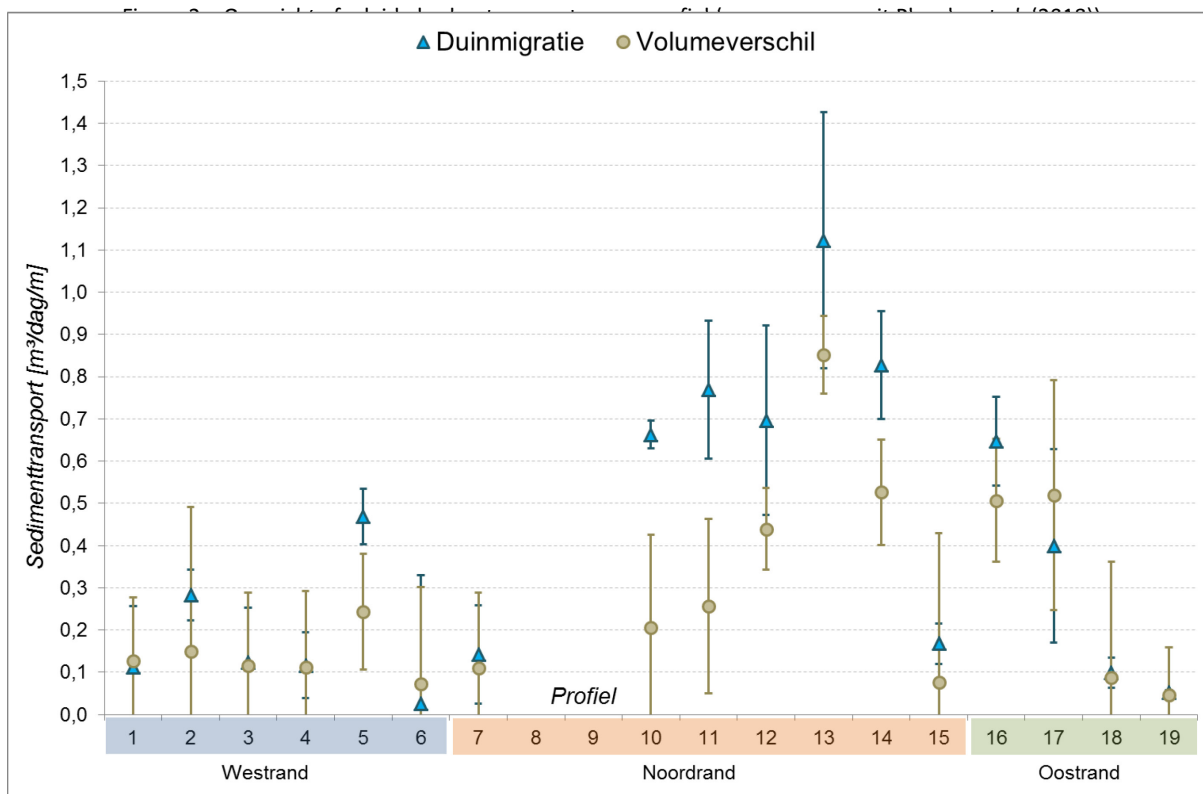
In 2018 werd in samenwerking met de Vlaamse Hydrografie de rand van de Platen van Ossensisse (Figuur 1) wekelijks gepeild met MBES met als doel het bodemtransport te bepalen op basis van de migratie van de aanwezige bodemvormen (Plancke *et al.*, 2018a).

Figuur 1 – Overzicht studiegebied en ligging profielen bodemvorm-analyse



Overgenomen uit Plancke *et al.* (2018).

Uit deze analyse bleek (Figuur 2) een variatie aanwezig te zijn tussen de verschillende profielen, waarbij de hoogste afgeleide transport gevonden werden langs de noordoost rand van de Platen van Ossensisse (profielen 12-14). Echter, langs de westrand treden grote stroomsnelheden op die naar verwachting ook aanleiding moeten geven tot grote sedimenttransport. Aangezien de aanwezige bodemvormen hier echter klein zijn (hoogte ~ 40 cm \Leftrightarrow langs noordrand ~ 80 cm), rees de vraag of de bodemtransporten bepaald op basis van de migratie van deze bodemvormen representatief zijn. Daarom werd voorliggende meetcampagne zo ingericht dat enerzijds een meetlocatie gekozen werd langs de westrand van de Platen van Ossensisse en anderzijds een meetlocatie langs de noordoost rand (zie § 2.2). Door het meten (zowel met directe als indirecte meettechnieken, zie § 2.3) van het sedimenttransport was een validatie mogelijk van de afgeleide bodemtransporten op basis van de migratie van de bodemvormen.



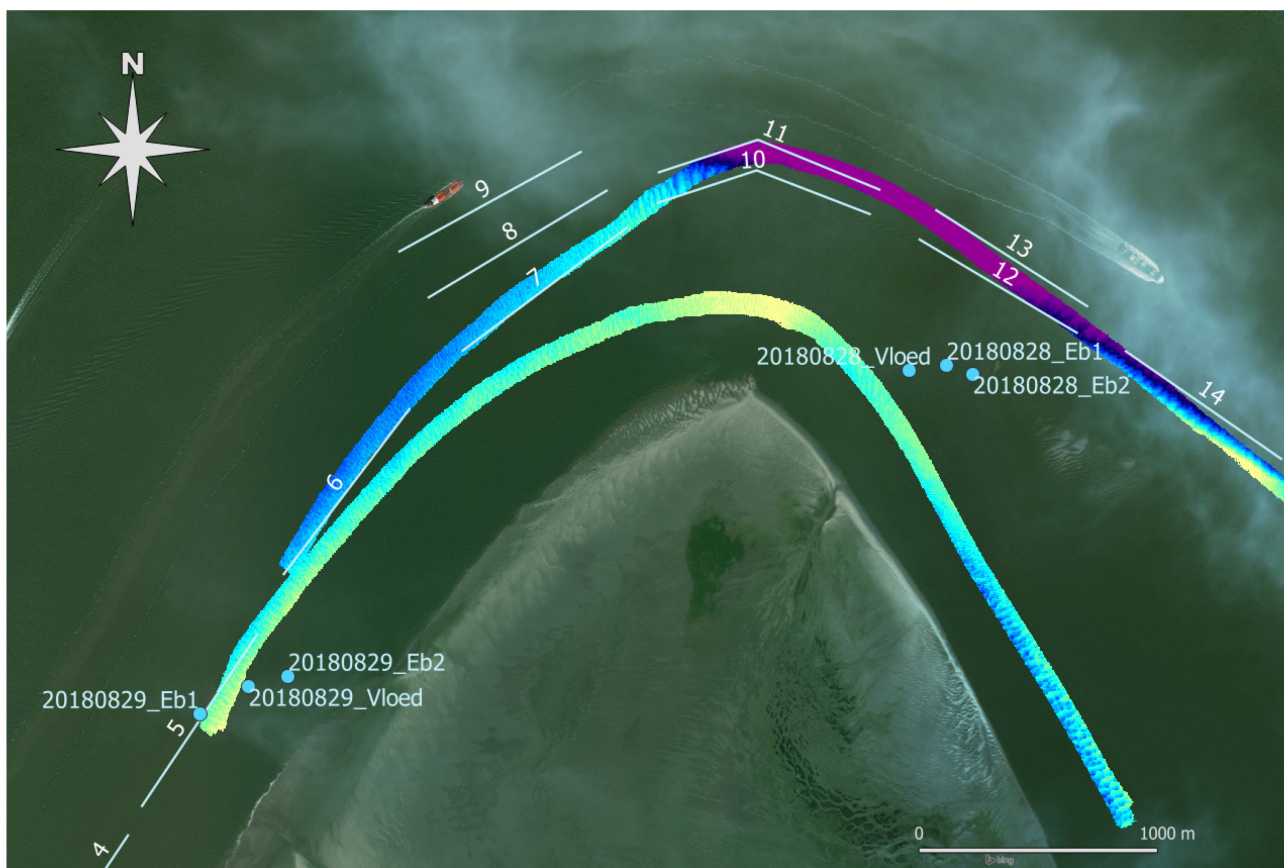
2.2 Meetlocaties

Voor deze meetcampagne werden 2 locaties gekozen langs de rand van de Platen van Ossensisse. Op basis van de afgeleide sedimenttransport uit de migratie van de bodemvormen, was het de intentie om één meetpunt te hebben nabij profiel 13 (grote bodemtransporten) en één meetpunt nabij profiel 5 (kleine bodemtransporten). Aangezien het stationaire metingen betrof, moest het meetschip (MS Pierre Petit) voor anker gaan.

Op de eerste meetdag (28/08/2018) was een locatie voorzien nabij profiel 13 (noordoost rand). Echter, bij het voor anker gaan zorgde een combinatie van factoren (sterke stroming, moeilijke ondergrond, ontbreken klassiek zwaar anker) ervoor dat het schip niet bleef liggen en dat alzo uitgeweken moest worden naar een alternatieve locatie in de omgeving (Figuur 3). Hierdoor zijn er geen frequente bathymetrische gegevens voor deze exacte locatie. Op de tweede meetdag (29/08/2018) was een locatie voorzien nabij profiel 5 (westrand). Hier traden geen problemen op bij het voor anker gaan en kon de gekozen locatie behouden worden.

Aangezien het meetschip niet beschikt over een tweede anker achteraan ("kontanker"), was het schip onderhevig aan zijwaartse bewegingen (onder invloed van stroming en wind), en is er een verschil in positie tijdens de eb- en vloedfase (zichtbaar door verschillende meetlocaties op Figuur 3). Op de eerste dag bleek de stroming bij maximum vloed zodanig sterk dat het schip geleidelijk meegetrokken werd door de stroming. Hiervoor moest tijdens deze periode de meting kort onderbroken worden om terug te keren naar de oorspronkelijke positie. Tijdens de tweede meetdag dreigde dit zich ook voor te doen, maar hier opteerde de schipper om het schip met de motoren ter plaatse te houden. Aangezien dit enkel een verstoring geeft in de bovenste 2m van de waterkolom (diepgang schip ca. 1,5m), wordt dit als niet hinderlijk voor de meting beschouwd (meeste toestellen geplaatst nabij de bodem).

Figuur 3 – Overzicht meetlocaties, duinprofielen uit Plancke *et al.* (2018) en MBES-zones opgemeten door RWS



2.3 Meettechnieken

Tijdens de meetcampagne werden verschillende toestellen ingezet voor het meten van zowel de stroming als het sedimenttransport. Het sedimenttransport werd zowel “direct” gemeten als “indirect”, waarbij een optisch of akoestisch signaal geconverteerd wordt naar sedimentconcentratie (via waterstalen), wat in combinatie met een stroomsnelheid uiteindelijk een sedimenttransport geeft. De verschillende ingezette meettechnieken worden hieronder kort beschreven.

2.3.1 Waterstanden

Voor de waterstanden werd beroep gedaan op de databank van Rijkswaterstaat (<https://waterberichtgeving.rws.nl/water-en-weer/dataleveringen/ophalen-opgetreden-data>). De metingen van de waterstandsmeter Hansweert worden gebruikt in dit rapport.

2.3.2 Wind

Aangezien de wind een belangrijk effect kan hebben op de waterstand, de stromingen en op het snelheidsprofiel – en dus eveneens onrechtstreeks op het sedimenttransport – wordt deze parameter eveneens meegenomen in dit rapport. Net zoals voor de waterstand werd beroep gedaan op de databank van Rijkswaterstaat. De gebruikte windgegevens (snelheid + richting) betreffen 10-minuut gemiddelde waarden op een hoogte van 10m boven het wateroppervlak, afkomstig van de windmeter te Hansweert.

2.3.3 Stroming

Aanderaa Seaguard

Het meetprincipe van de snelheid door de Aanderaa Seaguard is eveneens gebaseerd op het Dopplereffect. De Aanderaa Seaguard meet de snelheid in een punt (eigenlijk in een sfeer rondom het meettoestel). Tijdens deze meetcampagne was dit meettoestel gemonteerd op het frame van de Delftse fles (zie Figuur 4), met als doel de stroomsnelheid nabij de bodem (ca. 50 cm boven de bodem) te meten. Deze zone wordt niet door de down-looking ADCP in het schip bemeten omwille van het side-lobe-effect. De Aanderaa Seaguard werd ingesteld om één meting (voor alle parameters, i.e. stroming, druk, conductiviteit, temperatuur, turbiditeit) uit te voeren elke 5 seconden.

Acoustic Doppler Current Profiler

De stroming werd gemeten aan de hand van een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). De karakteristieken zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 – Overzicht karakteristieken ADCP

Toesteleigenschappen	
Type	RDI Workhorse Monitor
Frequentie	600 kHz
Configuratie	Down-looking vanaf meetschip
Beam hoek	20°
Aantal beams	4
Snelheidsresolutie	0,1 cm/s
Accuraatheid	0,3%
Ping rate	2 Hz (typical)
Instellingen	
Cel grootte	0,5 m
Eerste cel (midden)	0,8 m
Maximaal bereik	38 m
Ensemble interval	4 s
Pings per ensemble	4

2.3.4 Sedimenttransport

Het sedimenttransport wordt direct gemeten met behulp van de Delftse fles. De Delftse fles bestaat uit een bronzen lichaam met vooraan een kleine inlaatopening en achteraan vier openingen waardoor het water uitstroomt. Bij deze meetcampagne is gebruik gemaakt van de inlaatdiameter van 3,8 mm waarbij de 4 openingen aan de achterwand open gelaten worden. Door de uitwendige vorm ontstaat een drukverschil tussen inlaat en uitlaatopeningen dat de ladingsverliezen binnen het toestel ongeveer evenaart voor alle stroomsnelheden. Binnen moet het water en het sediment door een labyrint waarin de snelheid geleidelijk afneemt, zodat de sedimentdeeltjes groter dan 50 micron zich afzetten binnen het lichaam. De duur van de bemonstering kan worden aangepast aan de stroomsnelheid en sedimentconcentratie opdat het monster voldoende vaste stof zou bevatten. Het “gefilterd” volume water kan dus verschillende liters of zelfs tientallen liters bedragen. De fout die gemaakt wordt door de extra sedimentinvoer tijdens het neer- en ophalen van de Delftse fles is in het algemeen verwaarloosbaar. Gewoonlijk is het sedimentmonster groot genoeg om de korrelverdeling te bepalen.

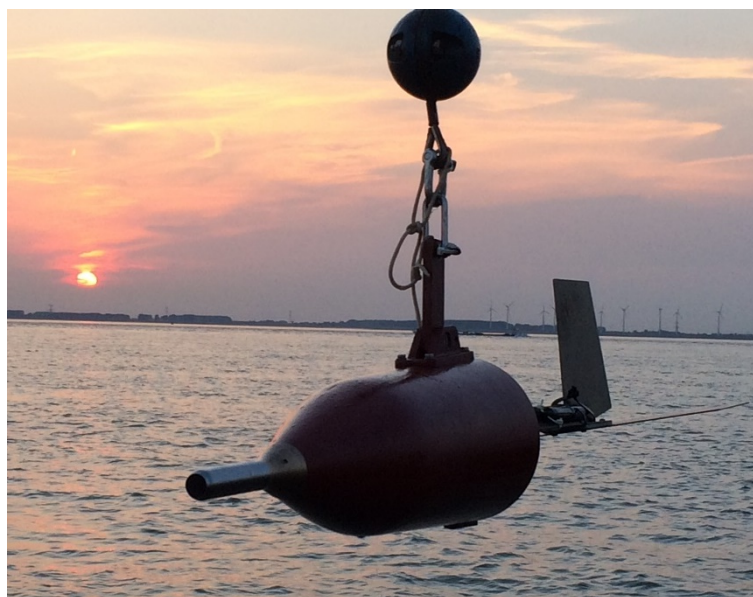
De Delftse fles werd ontworpen om gebruikt te worden tot heel dicht bij de bodem (nabij-bodem-transport; gewoonlijk 10 cm van de bodem). Voor de metingen beneden 50 cm van de bodem wordt het lichaam geplaatst op een structuur dat kan neergelaten worden op de bodem zelf (“frame” – Figuur 4). Daarnaast kan de Delftse fles ook gebruikt worden voor het meten van suspensietransport. Hiervoor wordt ze opgehangen aan een kabel, terwijl een bijkomend gemonteerde staart zorgt voor de oriëntatie volgens de stroomrichting (Figuur 5).

Daar de inlaatopening en de bemonsteringstijd gekend is, kan uit het gemeten volume sediment, mits een aanname voor de porositeit en de densiteit van het sediment, het sedimenttransport berekend worden.

Figuur 4 – Delftse fles op frame (links) en detail Aanderaa Sueguard (rechts) gemonteerd op staart frame



Figuur 5 – Opgehangen Delftse fles



Figuur 6 – Meetframe (links) en detail (rechts) meettoestellen: LISST-100X en Sontek-Vector



2.3.5 Sedimentconcentratie

Staalname

Tijdens de meetcampagnes werden op regelmatige tijdstippen watermonsters genomen, waarvan de sedimentconcentratie achteraf in het laboratorium werd bepaald. De waterstalen werden opgeslagen in flessen van 1000 ml. De sedimentconcentratie werd hierop via filtratie bepaald. Er werd geopteerd om enkel de totale (en geen aparte zand- en slibfractie) sedimentfractie te bepalen, gebruik makend van een filter van 0,45 μm .

Aan de hand van deze sedimentconcentraties kan een ijkingskromme worden opgesteld voor de indirecte meettechnieken en kan het meetsignaal omgezet worden in sedimentconcentraties.

Optische backscatter

De tijdens de meetcampagnes gebruikte Aanderaa Seaguard was uitgerust met een turbiditeitsensor. Deze sensor steunt op het principe van de verstrooiing van licht, een relatieve maat voor de lokale sedimentconcentratie (zowel slib als zand). Om de meting om te zetten naar sedimentconcentratie, is een ijking van de meetsensor vereist omdat de verschillende vaste stoffen volgens samenstelling en grootte een andere lichtverstrooiing geven. Combinatie van de concentratie met de snelheid – eveneens gemeten met de Aanderaa Seaguard – geeft het sedimenttransport. De Aanderaa Seaguard werd ingesteld om één meting uit te voeren elke 5 seconden.

Optische transmissie

De tijdens de meetcampagnes gebruikte LISST-100X maakt gebruik van laserdiffractie en scatter- en transmissiemeters om de sedimentconcentratie en de korrelgrootte te bepalen. Het uitgezonden laserlicht wordt door de aanwezige sedimentdeeltjes verstrooid onder een bepaalde hoek, afhankelijk van de eigenschappen van de sedimentdeeltjes. 32 concentrische detectors (elk overeenkomend met een bepaalde

verstrooiingshoek) detecteren het verstrooide lichtsignaal en laten toe zowel, op basis van de relatieve verdeling van het opgevangen signaal (in $\mu\text{l/l}$, i.e. volumeconcentratie) op de verschillende detectoren, de korrelgrootte te bepalen, als, op basis van de intensiteit van het opgevangen licht, de sedimentconcentratie te bepalen. De LISST-100X werd gemonteerd op een kubusvormig frame (Figuur 6) dat in de waterkolom gehangen werd, nabij de bodem. Tijdens de meetdag werd de positie in de verticale bijgesteld om in de onderste waterlagen gepositioneerd te blijven. Het toestel werd ingesteld om één meting uit te voeren elke seconde.

Akoestische backscatter ADCP

De sterkte van het gereflecteerde akoestische signaal van de ADCP (acoustic backscatter – ABS) is eveneens een maat voor de sedimentconcentratie. Hiervoor dient de gemeten intensiteit van het gereflecteerde signaal gecorrigeerd te worden voor de diepte, geluidsverliezen in het water en absorptie door het sediment (zie § 2.4.1) en dient een ijking te gebeuren op basis van de waterstalen.

2.3.6 Korrelgrootte

De LISST-100X laat toe in situ de korrelgrootte te bepalen. Voor de beschrijving wordt verwezen naar § 2.3.5. Op de stalen verzameld met de Delftse fles, werd eveneens de korrelgrootteverdeling bepaald. Daarnaast werden een aantal extra waterstalen genomen waarvan eveneens de korrelverdeling werd bepaald. Dit gebeurt door middel van laserdiffractie met behulp van de Mastersizer 2000 (Malvern Instruments). De analyse wordt uitgevoerd volgens een vastgelegd protocol. Hierbij wordt het staal eerst gezeefd op een zeef met maaswijdte 2 mm. Vervolgens wordt een representatief deelstaal genomen dat in het toestel wordt ingebracht. Alvorens de korrelgrootte te bepalen, wordt het ingebrachte staal onderworpen aan een ultrasone voorbehandeling, met als doel eventueel vlokken op te breken. Vervolgens wordt de korrelgrootte 3-maal bepaald op hetzelfde staal en wordt een gemiddelde kromme bepaald. Hiervan worden tenslotte de karakteristieke korreldiameters (D10, D35, D50, D65, D90) afgeleid.

2.3.7 Overige parameters

De Aanderaa Seaguard meet naast de stroomsnelheid eveneens de temperatuur, de druk en de conductiviteit van het water, telkens in de directe omgeving van het meettoestel. De saliniteit van het water kan aan de hand van deze 3 parameters berekend worden met behulp van de UNESCO-formule (UNESCO, 1983). Wegens de beperkte afhankelijkheid van de druk, werd deze parameter niet meegenomen in de berekeningen. De Aanderaa Seaguard werd ingesteld om één meting uit te voeren elke 5 seconden.

2.4 Verwerking indirecte meettechnieken

2.4.1 Sedimentconcentratie op basis van optische signalen

Om het signaal van turbiditeit bekomen uit de optische backscatter toestellen om te kunnen rekenen naar een sedimentconcentratie, worden pompstalen genomen ter hoogte van de sensor. Elke sedimentconcentratie, bepaald via filtratie, van een pompstaal wordt gerelateerd aan de turbiditeit van de OBS op moment van de staalname. Op basis van deze koppels (turbiditeit, SSC) wordt de ijking uitgevoerd tussen het OBS-sigitaal en de bijbehorende sedimentconcentratie.

Deze ijkingcurve wordt vervolgens toegepast op de volledige meetreeks van turbiditeit om een meetreeks van de sedimentconcentratie te verkrijgen.

Voor toestellen gebaseerd op het transmissie-principe (LISST-100) geldt een gelijkaardige procedure, met dit verschil dat niet de turbiditeit maar de volumeconcentratie als parameter gebruikt wordt.

2.4.2 Sedimentconcentratie op basis van akoestische backscatter

Om de sedimentconcentratie af te leiden uit de akoestische backscatter, dient vooreerst de gemeten intensiteit van het gereflecteerde signaal gecorrigeerd te worden voor de diepte, geluidsverliezen in het water en absorptie door het sediment. De methodiek die binnen voorliggend rapport is gebruikt is analoog aan deze van (Landers *et al.*, 2016) en bevat volgende stappen:

1. Converteren interne units (counts) naar log schaal (dB)
2. Range normalization – corrigeren van de ruwe intensiteit van de backscatter ABS (dB) voor geluidsabsorptie in water en door sediment
3. Kalibratie van het genormaliseerde backscatter signal cABS (dB) op basis van pompstalen waaruit de SSC is bepaald via filtratie (mg/l)
4. Omrekenen van cABS (dB) naar SSC (mg/l) met kalibratieformule

Vooraleer deze stappen worden toegepast, vindt een validatie van de metingen plaats. Hierbij worden enerzijds de niet-bemeten cellen verwijderd en worden anderzijds slechte metingen verwijderd.

Validatie metingen

De ADCP geeft resultaten voor het volledige bereik van de cellen. Op basis van de diepte van bodem, bepaald via de bodemdetectie functie ("bottom-track"), werden alle metingen beneden dit niveau verwijderd. Daarnaast werden ook alle metingen (en dit voor alle parameters) met onrealistische waarden (cfr. dummy waarde = -32768) verwijderd.

Stap 1: Converteren interne units naar log schaal

Lohrmann (2001) stelt dat de interne units (counts) geconverteerd kunnen worden naar decibels (dB) via een lineaire omrekening met een range van 70 dB. Binnen deze range (overeenkomend met 1 tot 10000 mg/l) bedraagt de schaalfactor (toestel-afhankelijk) $K_c = 0,43$ counts/dB (range 0,40 tot 0,47). Buiten deze range is de conversie niet-lineair.

$$K_c = 0.43 \text{ dB/count}$$

Stap 2: Range normalization

De tweede stap omvat het corrigeren van het ruwe ABS-sigitaal naar een gecorrigeerd signal (cABS). De correcties die uitgevoerd dienen te worden omvatten 3 factoren: akoestische spreiding, water absorptie en

sediment absorptie. Voor een uitgebreide beschrijving worden verwezen naar (Landers *et al.*, 2016; Lohrmann, 2001).

$$\begin{aligned} \text{akoestische spreiding} &= 20 \log_{10} R \\ \text{water absorptie} &= 2\alpha_w R \quad \left(\alpha_w = \text{water absorptie in } \frac{dB}{m} \right) \\ \text{sediment absorptie} &= 20R \int \alpha_p dr \quad \left(\alpha_p = \text{sediment absorptie in } \frac{dB}{m} \right) \\ R &= \text{range} = z / \cos(\text{hoek van bundel}) \end{aligned}$$

De water absorptie is afhankelijk van de densiteit van het water (en dus saliniteit), de druk en de frequentie van het uitgezonden akoestische signaal.

Hoewel de sediment absorptie bij lage (< 1 g/l) concentratie meestal verwaarloosbaar is, wordt hij expliciet meegenomen. Deze coëfficiënt α_p wordt berekend volgens de hybride manier ((Landers *et al.*, 2016) gebaseerd op (Urick, 1983) en (Sheng & Hay, 1988)).

De range normalization levert de gecorrigeerde/normaliseerde akoestische backscatter (cABS) volgens volgende formule:

$$cABS = Amp * K_c + \text{akoestische spreiding} + \text{water absorptie} + \text{sediment absorptie}$$

Stap 3: kalibratie cABS naar SSC

In de volgende stap wordt de gecorrigeerde akoestische backscatter (cABS) vergeleken met de sedimentconcentratie bekomen uit de pompstalen. Hiertoe wordt de cABS geselecteerd op het moment van de staalname (bin) en wordt de overeenkomstige cel bepaald op basis van de diepte waarop de staalname plaatsvond. Dit laat toe een ijking uit te voeren tussen het cABS-signaal en de bijbehorende sedimentconcentratie.

Indien bijkomende SSC-gegevens bekomen worden via bv. een profilering met een OBS-toestel, kunnen ook deze afgeleide sedimentconcentraties gebruikt worden voor het kalibreren van de cABS. Binnen dit project werden er geen specifieke profileringen uitgevoerd en worden dan ook louter de pompstalen gebruikt voor de ijking.

Stap 4: converteren van cABS naar SSC

De kalibratiecurve uit de vorige stap wordt tenslotte toegepast op de volledige meetreeks van cABS. Op deze manier kan de cABS geconverteerd worden naar een sedimentconcentratie.

Indien ook het sedimenttransport noodzakelijk is, kan dit bekomen worden door het geconverteerde SSC signaal (mg/l) te vermenigvuldigen met de snelheid (m/s) en de oppervlakte (m²) van de overeenkomstige cel van de ADCP. Sommatie over de verticale, mits aannames voor een eventuele extrapolatie naar de niet bemeten zones nabij de bodem (side-lobe-effect) en het wateroppervlak (blanking distance), laat toe een totaal sedimenttransport voor het punt af te leiden.

Binnen dit rapport is ervoor gekozen volgende extrapolatie uit te voeren:

- Naar wateroppervlak: constant houden van gemeten sedimenttransport in bovenste cel
- Naar bodem: lineaire afname van waarde in onderste cel naar 0 op de bodem

3 Resultaten dag 1 (28/08/2018)

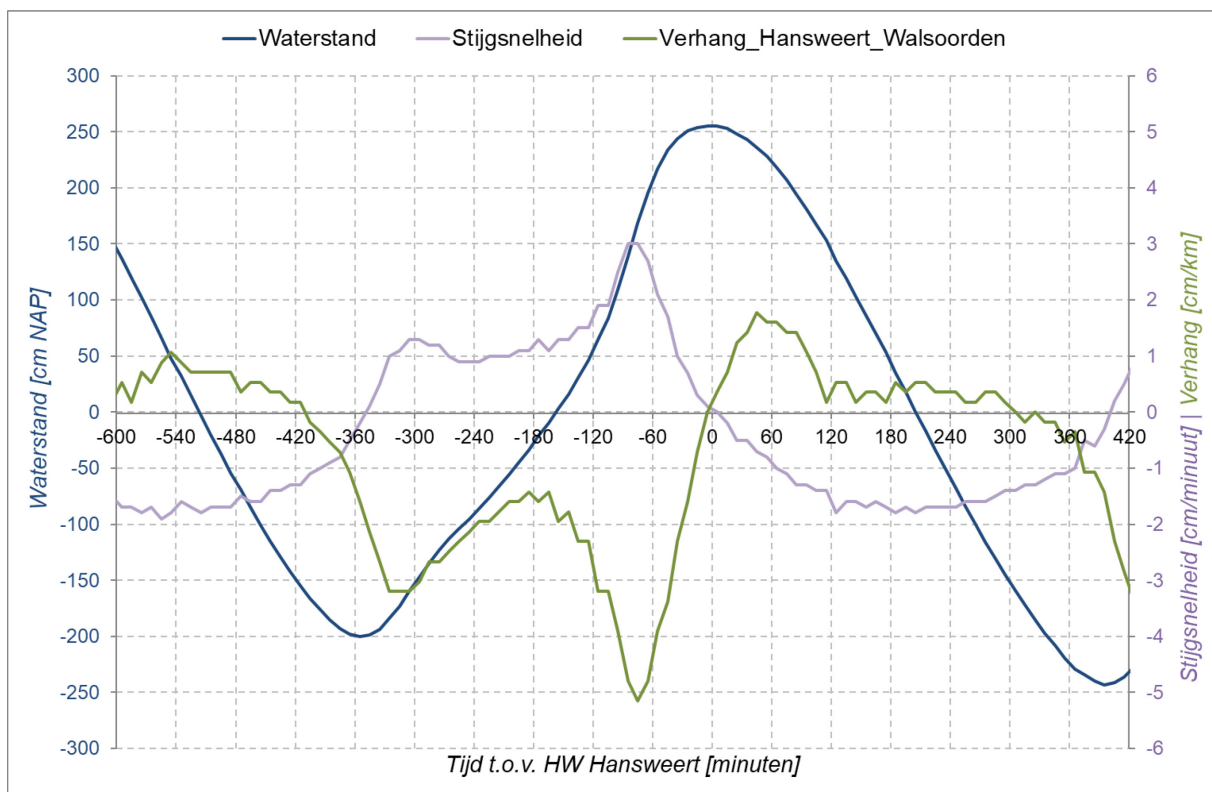
In de volgende paragrafen worden de resultaten gepresenteerd per toestel. Bij de Delftse fles wordt onmiddellijk het sedimenttransport gemeten, terwijl bij de indirecte toestellen de sedimentconcentratie wordt afgeleid na kalibratie uit het gemeten signaal. Combinatie van de sedimentconcentratie met de snelheid laat toe het sedimenttransport te bepalen.

De resultaten van de Aanderaa Seaguard 2500 van de eerste meetdag werden bij het herprogrammeren van het toestel voor de tweede meetdag overschreven. Voor deze meetdag zijn dus geen gegevens beschikbaar.

3.1 Waterstanden

Figuur 7 geeft het verloop van de waterstand te Hansweert weer. De stijging tijdens de meetdag bedroeg 455 cm, terwijl de daling 498 cm bedroeg. Ter vergelijking: over de periode 2011-2015 bedroeg het gemiddeld getijverschil te Hansweert 449 cm, terwijl dit bij springtij 506 cm bedroeg (Hertoghs *et al.*, 2018).

Figuur 7 – Verloop waterstand, stijgsnelheid en verhang meetdag 1 (28/08/2018)



3.2 Delftse fles

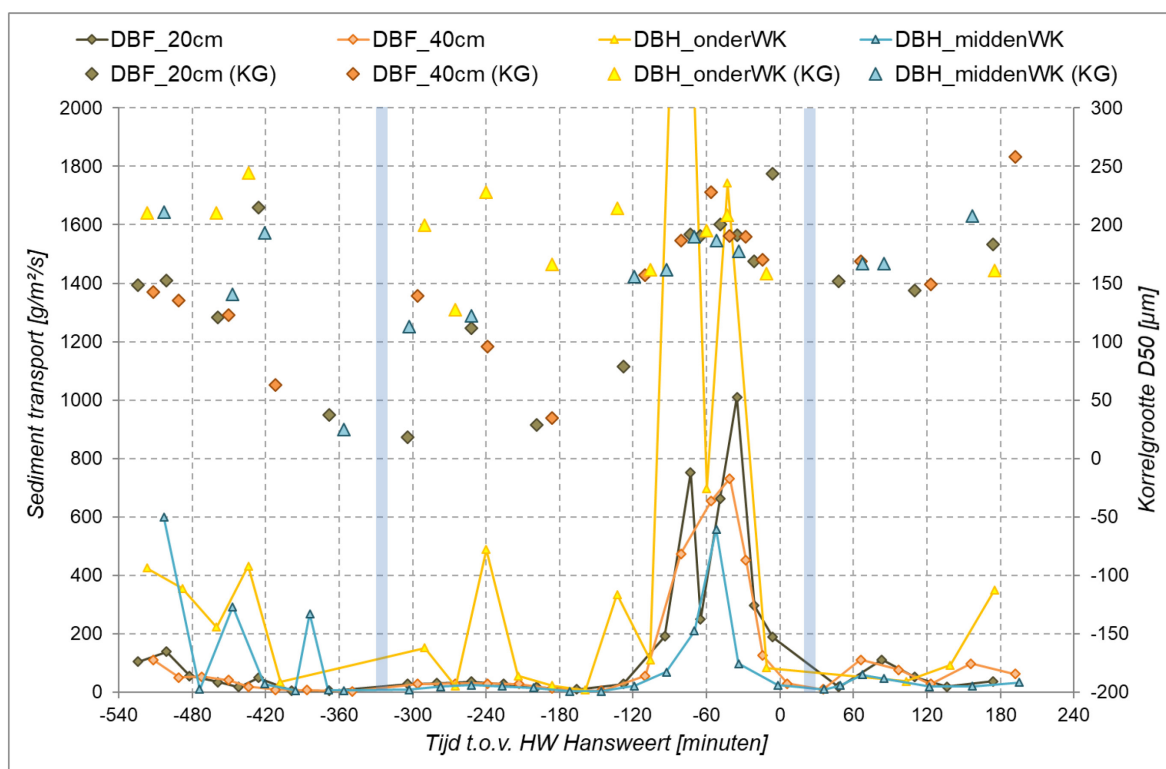
Tijdens de meetcampagne werd zowel de Delftse fles op haar frame gebruikt voor het meten van het nabijbodem transport (20 en 40 cm boven de bodem), als de opgehangen Delftse fles voor het suspensie transport. De opgehangen Delftse fles werd vooral in de onderste helft van de waterkolom gepositioneerd in de veronderstelling dat het sedimenttransport in de bovenste helft van de waterkolom minder uitgesproken is. Naast het sedimenttransport (direct afgeleid uit de sedimentvolumes afgevangen in de fles) werden voor een selectie van de monsters ook de korrelverdeling bepaald in de laboratorium.

Figuur 8 geeft het verloop weer van zowel het sedimenttransport op verschillende diepte, als de variatie van de mediane korrelgrootte (D50). Voor de opgehangen Delftse fles werden de stalen in de onderste zone (70-90%) van de waterkolom gegroepeerd (onderWK), alsook de overige stalen in de middelste zone (40-70%) van de waterkolom (middenWK). Er zijn geen metingen uitgevoerd in de bovenste 40% van de waterkolom.

Uit onderstaande figuur komt duidelijk de piek in het sedimenttransport naar voor ca. 60' voor hoogwater, op het moment dat de vloedstroming maximaal is (zie verder). Tijdens de overige fasen van getij is het sedimenttransport aanzienlijk lager. In het diepteprofiel worden de kleinste transporten steeds teruggevonden in de middelste zone van de waterkolom en zal vermoedelijk nog hoger het transport verder afnemen. Opmerkelijk is wel dat de hoogste transporten worden teruggevonden in de onderste suspensie zone (70-90% van de waterkolom) en niet nabij de bodem zoals bij eerdere metingen (Plancke *et al.*, 2014).

De mediane korrelgrootte vertoont op de meeste dieptes een variatie binnen de getijcyclus: gedurende de laatste fase van de eb en het begin van de vloed (HW-420' tot HW-120') is er vooral silt en (zeer) fijn zand teruggevonden in de fles. Tijdens de maximale vloedstroming (HW-120' tot HW) en het begin van de eb fase (HW tot HW+180') is bestaat het getransporteerd sediment uit matig fijn zand (D50 ~ 150-200 μm). Uitzondering is de middelste zone waar het getransporteerde sediment steeds uit matig fijn en matig grof (D50 ~ 150-250 μm) zand bestaat.

Figuur 8 – Verloop sedimenttransport en D50 op basis van Delftse fles tijdens meetdag 1 (28/08/2018)
DBF = Delftse fles op frame | DBH = opgehangen Delftse fles | WK = waterkolom | KG = korrelgrootte



3.3 LISST-100

De LISST-100 was bevestigd op het meetframe dat gedurende de volledige meetdag in de waterkolom hing. De intentie was om steeds in de onderste helft van de waterkolom te meten, waarvoor het frame op regelmatige tijdstippen gevierd (periode LW => HW) of opgehaald ((periode HW => LW) werd. Deze variatie is terug te vinden in Figuur 11 (boven) waar de druk wordt weergegeven. De variatie bedraagt ca. 4 hPa gedurende de volledige meetdag, wat neerkomt op ca. 4m variatie in verticale positie in de waterkolom.

In de volgende paragraaf wordt eerst ingegaan op de kalibratie van de LISST-100 (voor beide meetdagen), waarna de resultaten in § 3.3.2 worden gepresenteerd.

Tijdens de eerste meetdag bleek dat mechanische schakelaar van het toestel “uit” stond, waardoor tijdens de eerste uren (HW-540' tot HW-300') geen gegevens geregistreerd werden.

3.3.1 Kalibratie

Figuur 9 geeft de relatie weer tussen de door LISST-100 gemeten volumeconcentratie ($\mu\text{l/l}$) en de overeenkomstige sedimentconcentratie afgeleid uit de pompstalen (mg/l). Wanneer het sediment uit louter primaire partikels bestaat, zou dit verband lineair moeten zijn met een verhouding gelijk aan de densiteit van het sediment ($2,65 \text{ t/m}^3$). Uit Figuur 9 blijkt dat deze relatie niet éénduidig aanwezig is.

Om inzicht te krijgen in de verklarende factoren van deze spreiding, is in Figuur 10 het verloop van de verhouding van de massa- en volumeconcentratie uitgezet in de tijd, voor beide meetdagen. Hieruit blijkt dat op beide dagen voor het grootste deel van het getij de verhouding veel kleiner is dan 2,65. Enkel in de periode rond de maximale vloedstroming (HW-120' tot HW) neemt de verhouding toe om rond ca. HW-60' een maximum te bereiken (enkel tijdens de tweede meetdag werd de theoretische waarde van 2,65 bereikt). Dit patroon is in overeenstemming met de gemeten sedimenttransporten met de Delftse fles: in de periode van maximum vloedstroming werd daar een piek gemeten, bestaande uit hoofdzakelijk zanderig sediment. In de overige getijfasen was het sediment fijner (silt en fijn zand).

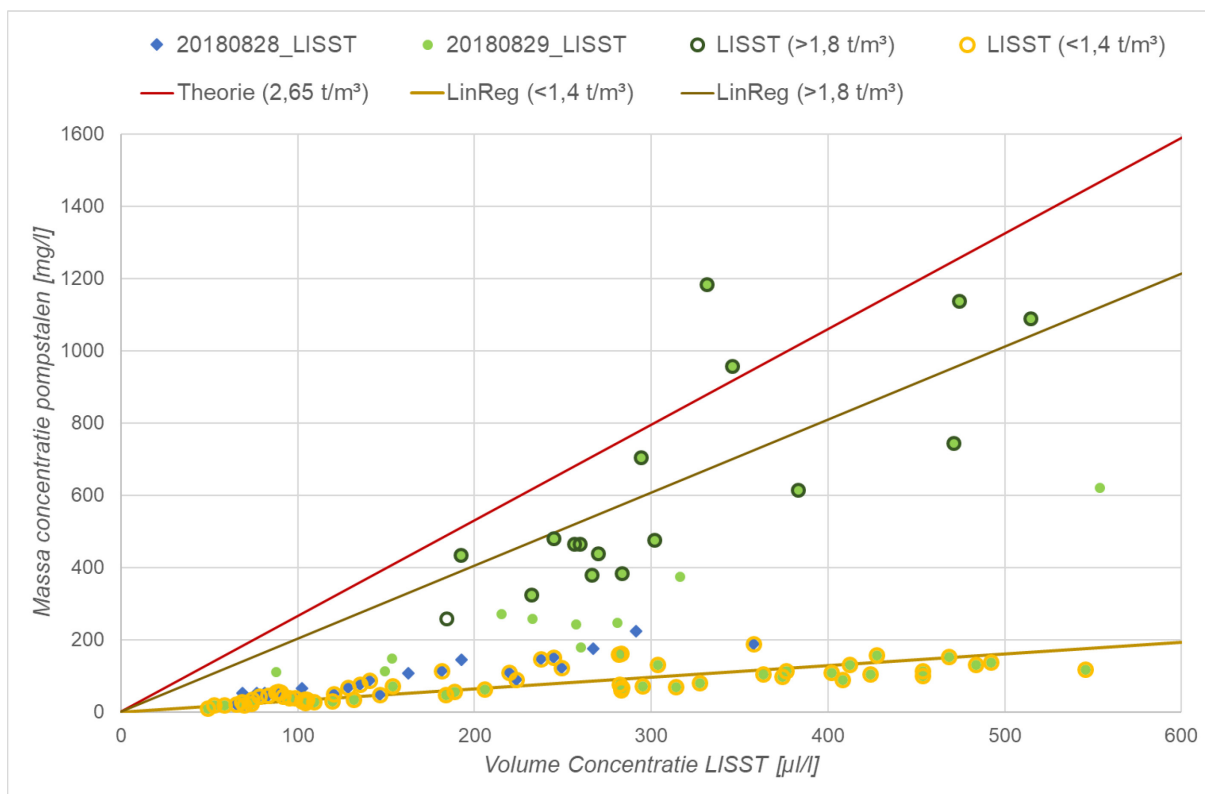
De lagere verhouding tussen massa- en volumeconcentratie gemeten met de LISST-100 duidt op de aanwezigheid van “lichtere” deeltjes, i.e. vlokken. Bij een vlok bestaat het volume uit zowel partikels als water, waardoor de verhouding tussen massa- en volumeconcentratie aanzienlijk kleiner is dan 2,65. Een verhouding van 0,25 (representatief voor periode HW-600' tot HW-120') komt overeen met een densiteit van $1,16 \text{ t/m}^3$. Uit eerdere studies in het Schelde-estuarium (o.a. Plancke & Paridaens, 2012) is gebleken dat dergelijke waarde ook op andere locaties in het estuarium kan worden teruggevonden.

Voor de kalibratie van de LISST-100 levert dergelijke temporele variabiliteit een moeilijkheid op: één ijking op de volledige data resulteert in een curve die niet representatief voor één van beide fracties, en zal de sedimentconcentratie overschatten voor de vlokken en onderschatten bij zandkorrels. Om dit te vermijden is ervoor gekozen om een dubbele kalibratie toe te passen, gebaseerd op de variatie van de verhouding tussen massa- en volumeconcentratie op beide meetdagen:

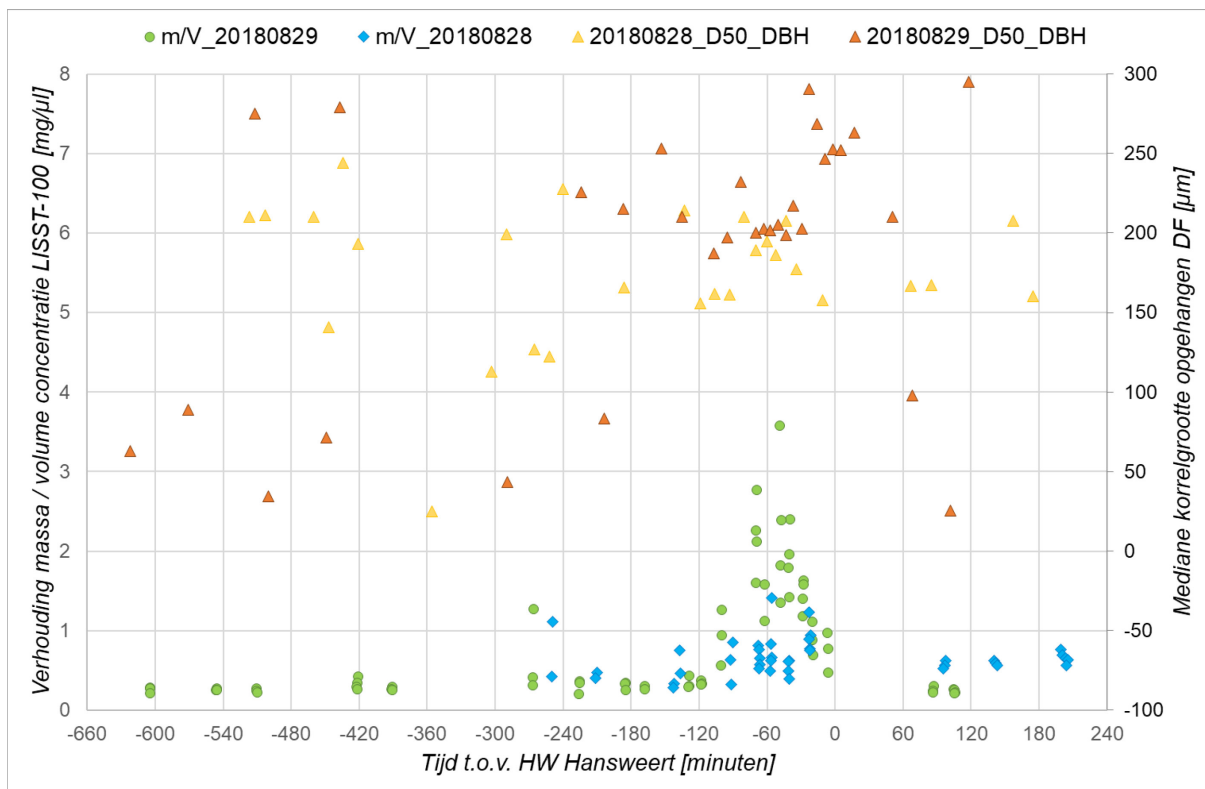
- **Periode voor HW-120'**: ijkingcurve gebaseerd op vlokken ($\rho < 1,4 \text{ t/m}^3$) met kalibratiefactor = 0,32 ($R^2 = 0,63$) (Figuur 9 – punten gele markering en okergele ijkingcurve)
- **Periode tussen HW-120' en HW**: lineair variërend tussen deze gebaseerd op vlokken ($\rho < 1,4 \text{ t/m}^3$ | kalibratiefactor = 0,32) en deze op zuivere zandkorrels ($\rho > 1,8 \text{ t/m}^3$ | kalibratiefactor = 2,02 ($R^2 = 0,61$)) - Figuur 9 – punten donkergroene markering en kaki ijkingcurve); de maximale kalibratiefactor wordt enkel toegepast op het moment HW-60', in de periode van 60' ervoor en erna neemt die lineair af tot 0,32, in overeenstemming met graduele variatie terug te vinden in Figuur 10; hiermee worden eveneens bruske overgangen vermeden
- **Periode na HW**: ijkingcurve gebaseerd op vlokken ($\rho < 1,4 \text{ t/m}^3$) met kalibratiefactor = 0,32 (Figuur 9 – punten gele markering en okergele ijkingcurve)

Belangrijk is op te merken dat deze benadering niet algemeen kan toegepast worden en locatie-specifiek is!

Figuur 9 – Relatie tussen volumeconcentratie LISST-100 en SSC pompstalen op beide meetdagen



Figuur 10 – Verloop verhouding massa- tot volumeconcentratie en D50 uit opgehangen Delftse fles op beide meetdagen



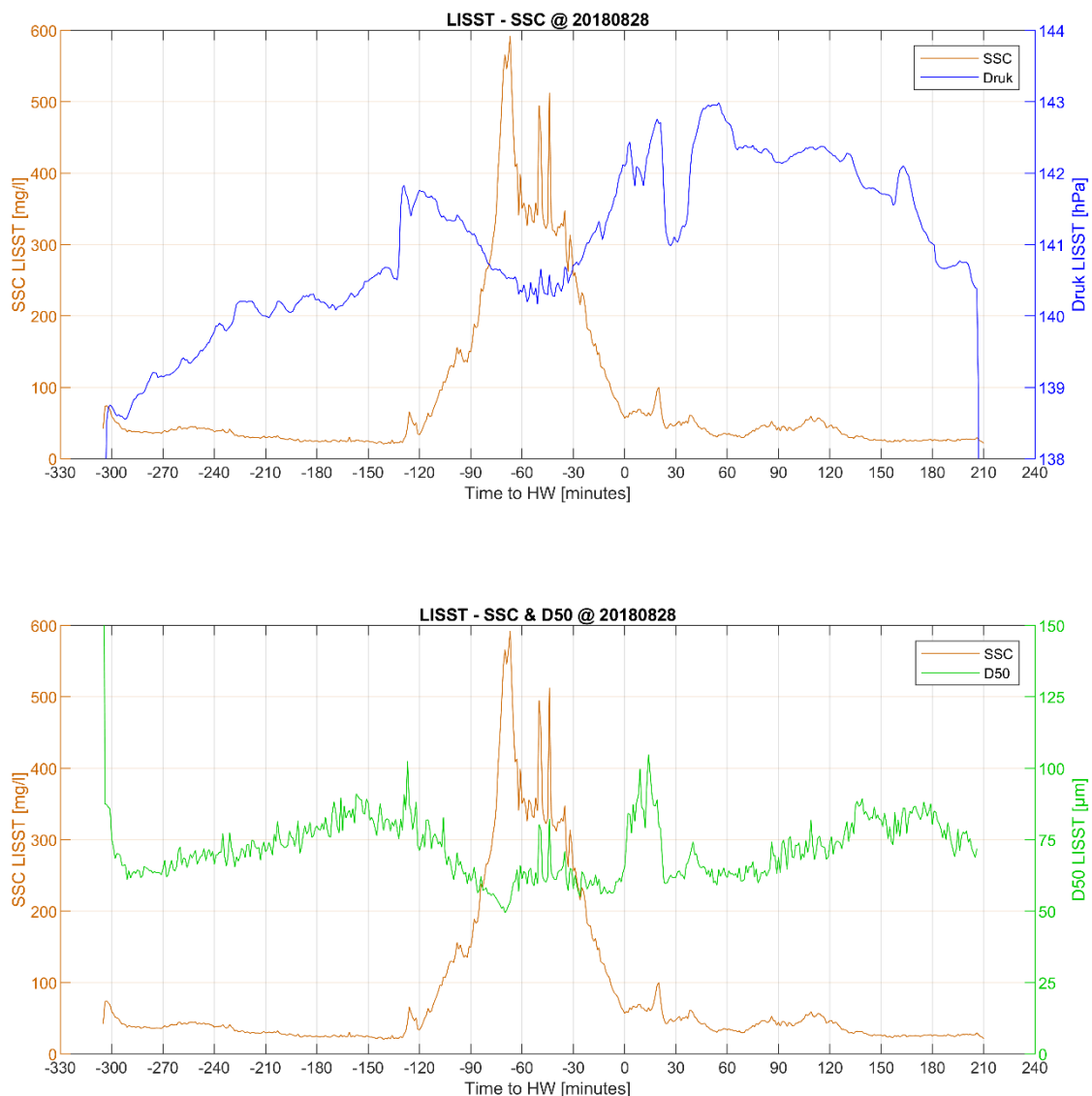
3.3.2 Sedimentconcentratie

Figuur 11 geeft het verloop van de afgeleide sedimentconcentratie en de mediane korrelgrootte (D50) weer tijdens de eerste meetdag. De sedimentconcentratie vertoont een gelijkaardig patroon als dit gemeten met de Delftse fles: gedurende het merendeel van het getij eerder beperkte (~ 50 mg/l) sedimentconcentraties, die sterk toenemen in de periode tussen HW-120' en HW (piekwaarde ~ 600 mg/l).

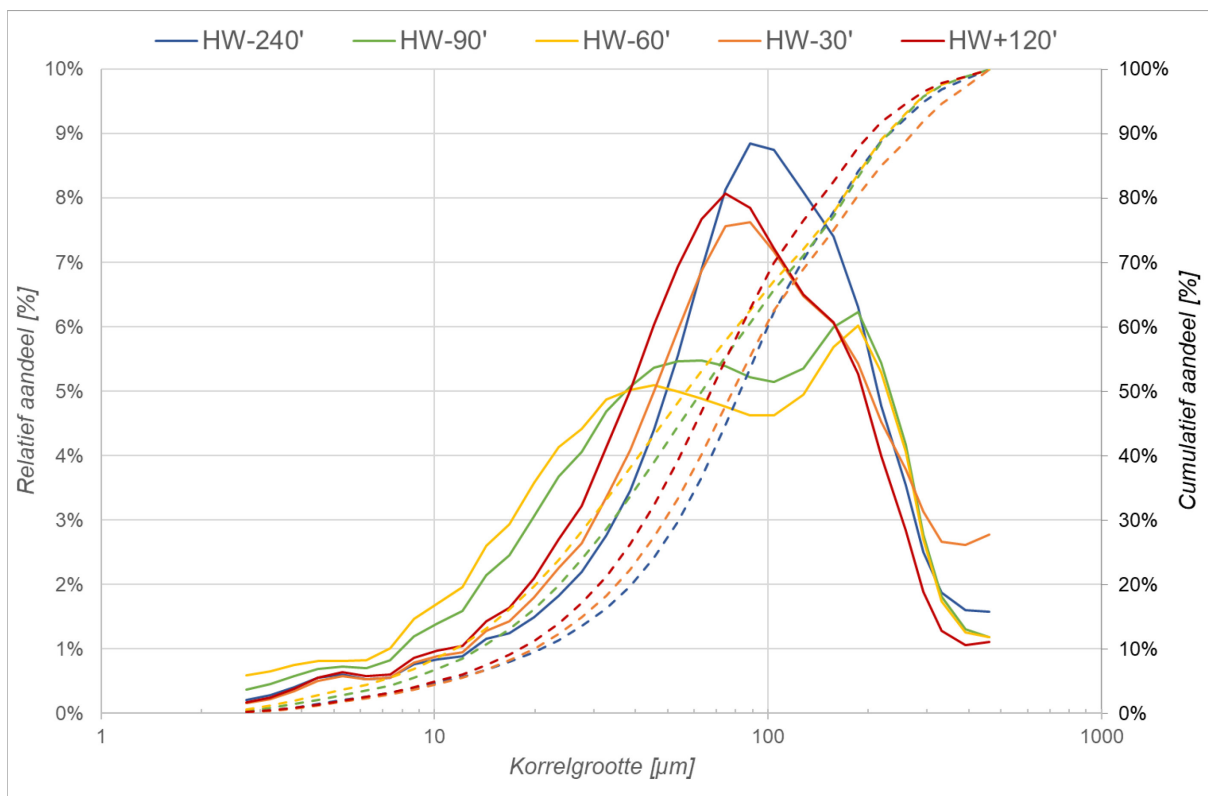
De mediane korrelgrootte vertoont minder variatie, wat kan toegeschreven worden aan de aanwezigheid van vlokken: in de periode van lage SSC bestaat de sedimentfractie hoofdzakelijk uit vlokken (bevestigd door verhouding tussen massa- en volumeconcentratie) die gemiddeld ca. 75 μm groot zijn; opmerkelijk is dat in de periode van maximale vloedstroming de mediane korrelgrootte afneemt (tot ca. 60 μm) wat niet in overeenstemming met de toename in D50 (tot ca. 200 μm) in het sediment uit de Delftse fles.

Figuur 12 toont aan dat deze verfijning van de D50 tijdens maximale vloedstroming (HW-60') niet uniform optreedt maar het gevolg is van een twee dominante fracties: één fractie kleiner dan 63 μm (klei en silt, wat niet achterblijft in de Delftse fles) en één zandfractie met korrelgrootte rond 200 μm (van overkomt met fractie gemeten in de Delftse fles).

Figuur 11 – Verloop sedimentconcentratie en druk (boven) en D50 (onder) op basis van LISST-100 tijdens meetdag 1 (28/08/2018)



Figuur 12 – Korrelverdeling op basis van LISST-100 voor verschillende momenten tijdens meetdag 1 (28/08/2018)



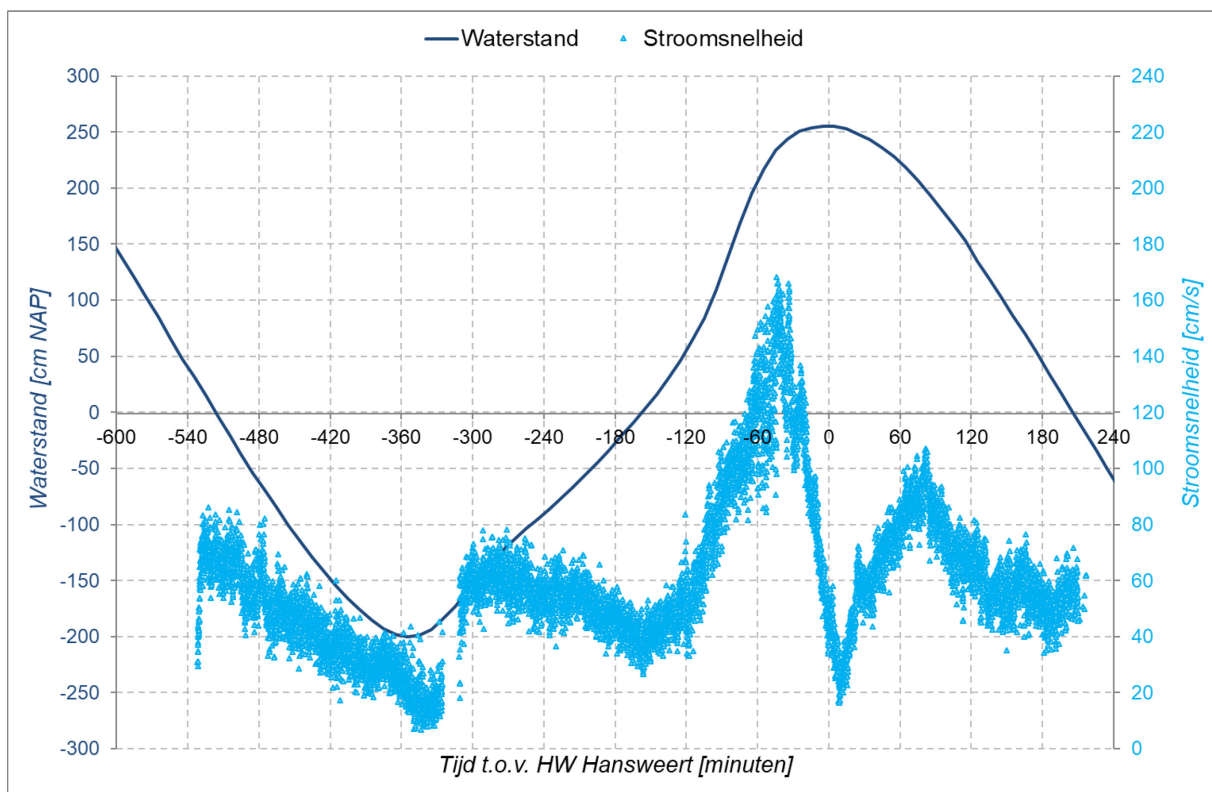
3.4 ADCP

3.4.1 Stroming

Figuur 13 geeft het verloop van de diepte-gemiddelde stroomsnelheid weer, bepaald uit de ADCP-metingen. Figuur 16 (boven) geeft het verloop van de stroomsnelheid weer over het volledige bemeten verticale profiel. Voor het bepalen van het gemiddelde werd geen extrapolatie uitgevoerd naar de bodem (side-lobe effect) of het wateroppervlak (blanking distance). Tijdens de vloedfase blijft de snelheid initieel (HW - 300' tot HW-120') beperkt 60 cm/s. Vervolgens neemt de snelheid snel toe tot 160 cm/s op ca. HW - 60'. Nadien neemt de snelheid om te kenteren iets na HW. In de ebfase neemt de snelheid initieel toe tot 100 cm/s (HW + 60') om vervolgens geleidelijk af te nemen (ca. 50 cm/s op HW + 180').

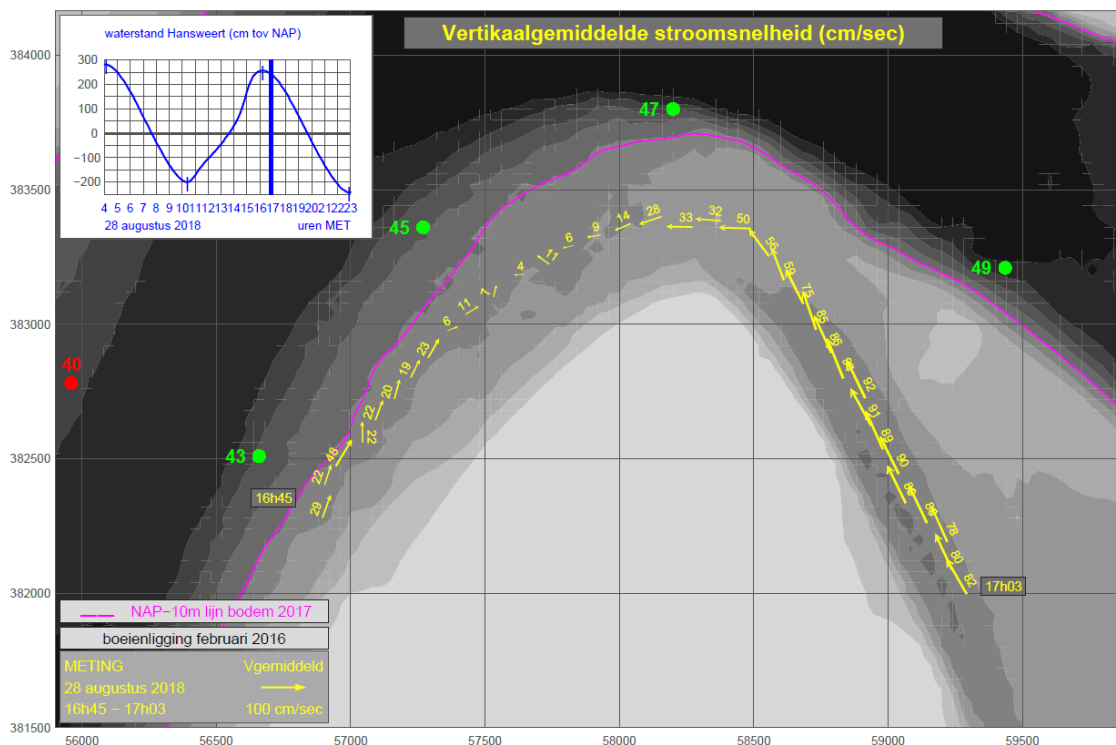
De relatief korte tijd tussen hoogwater en de kentering komt ook duidelijk tot uiting uit de varende meting (uitgevoerd door Rijkswaterstaat, Figuur 14). Langs de westrand (meetlocatie op dag 2, zie § 4.5.1) de Platen van Ossensisse is de stroming nog vloed-georiënteerd, terwijl langs de ostrand (meetlocatie op dag 1) al een sterke eb-georiënteerde stroming aanwezig is.

Figuur 13 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid op meetdag 1 (28/08/2018)



Figuur 14 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid uit varende meting op meetdag 1 (28/08/2018)
Bron: Rijkswaterstaat Zee en Delta

Plaat van Ossenisse dinsdag 28 augustus 2018 16h45 – 17h03



3.4.2 Kalibratie

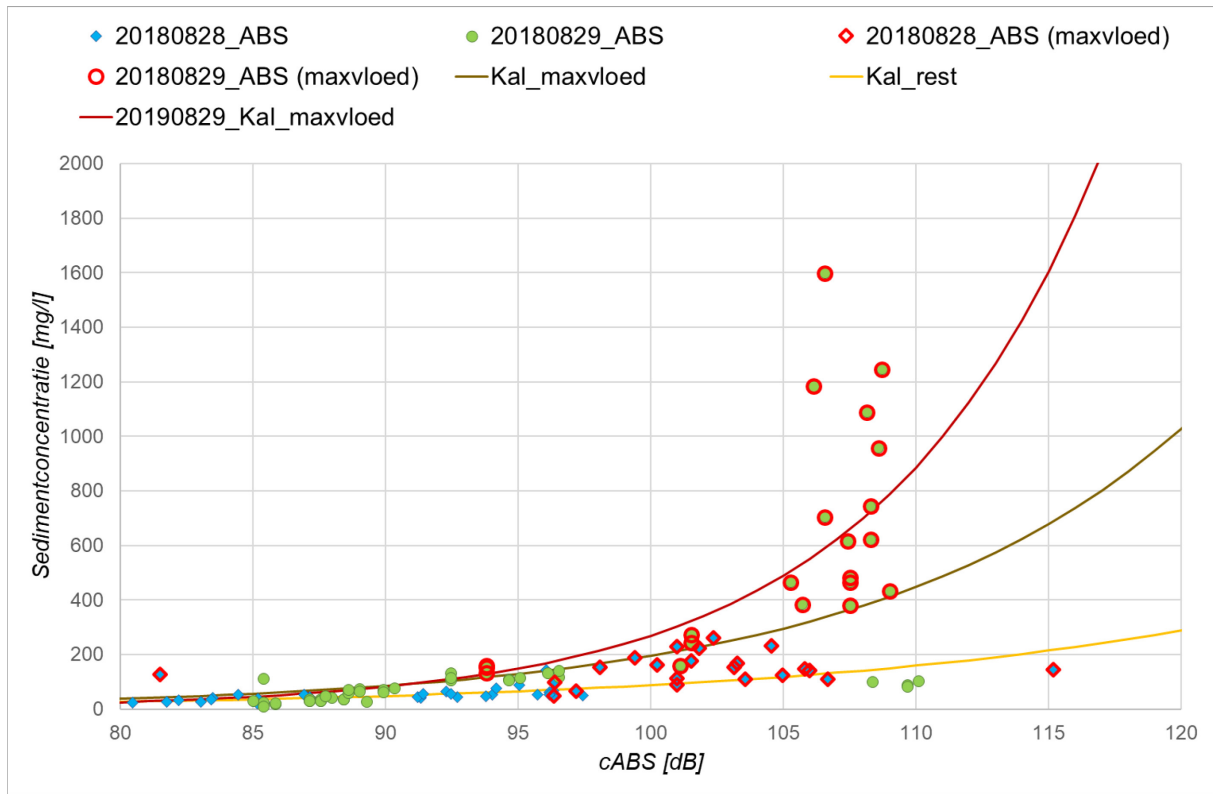
Figuur 15 geeft de relatie weer tussen de gecorrigeerde akoestische backscatter (cABS in dB) gemeten door de ADCP en de overeenkomstige sedimentconcentratie afgeleid uit de pompstalen (mg/l). Net zoals bij de LISST-100 is er voor de hogere waarden van de cABS een grote spreiding in overeenkomstige SSC vast te stellen. Ook op Figuur 15 worden de meetpunten uit de periode rond de maximale vloedstroming (HW-120' tot HW) apart beschouwd (rode cirkel) en blijken deze logischerwijs overeen te komen met de hoogste sedimentconcentraties. Analoog aan de methode gekozen voor de kalibratie van de LISST-100, wordt ook voor cABS een onderscheid aangehouden in de verschillende fases van het getij, al wordt gebruik gemaakt van een exponentiële ijkingscurve [$\ln(SSC) = a \cdot cABS + b$]:

- **Periode voor HW-120' en periode na HW:** aparte ijkingscurve (Figuur 15 – gele ijkingscurve) met $a = 0,06$ en $b = -1,51$ ($R^2 = 0,42$)
- **Periode tussen HW-120' en HW:** coëfficiënten a en b lineair variërend tussen deze gebaseerd op bovenstaande ijkingscurve en deze op het moment van maximum vloed (Figuur 15 – rode ijkingscurve): $a = 0,12$ en $b = -6,30$ ($R^2 = 0,66$)

Aangezien het onderscheid bij maximum vloed zich hoofdzakelijk manifesteert op de tweede meetdag is ervoor gekozen om de ijkingscurve te baseren op de punten tijdens de maximum vloedfase op de tweede meetdag (29/08/2018). Op Figuur 15 is eveneens de ijkingscurve (kaki) weergegeven wanneer alle punten uit beide meetdagen tijdens de maximum vloedfase worden beschouwd. Hieruit blijkt duidelijk een onderschatting van de sedimentconcentratie voor de tweede meetdag. Opgemerkt kan worden dat bij hoge SSC de cABS lijkt te plafonneren (~ 110 dB). Dit hangt samen met de sediment absorptie-coëfficiënt die voor hoge concentraties belangrijker wordt in de omrekening van ABS naar cABS.

Belangrijk is op te merken dat deze benadering niet algemeen kan toegepast worden en locatie-specifiek is!

Figuur 15 – Relatie tussen gecorrigeerde ABS (ADCP) en SSC pompstalen op beide meetdagen

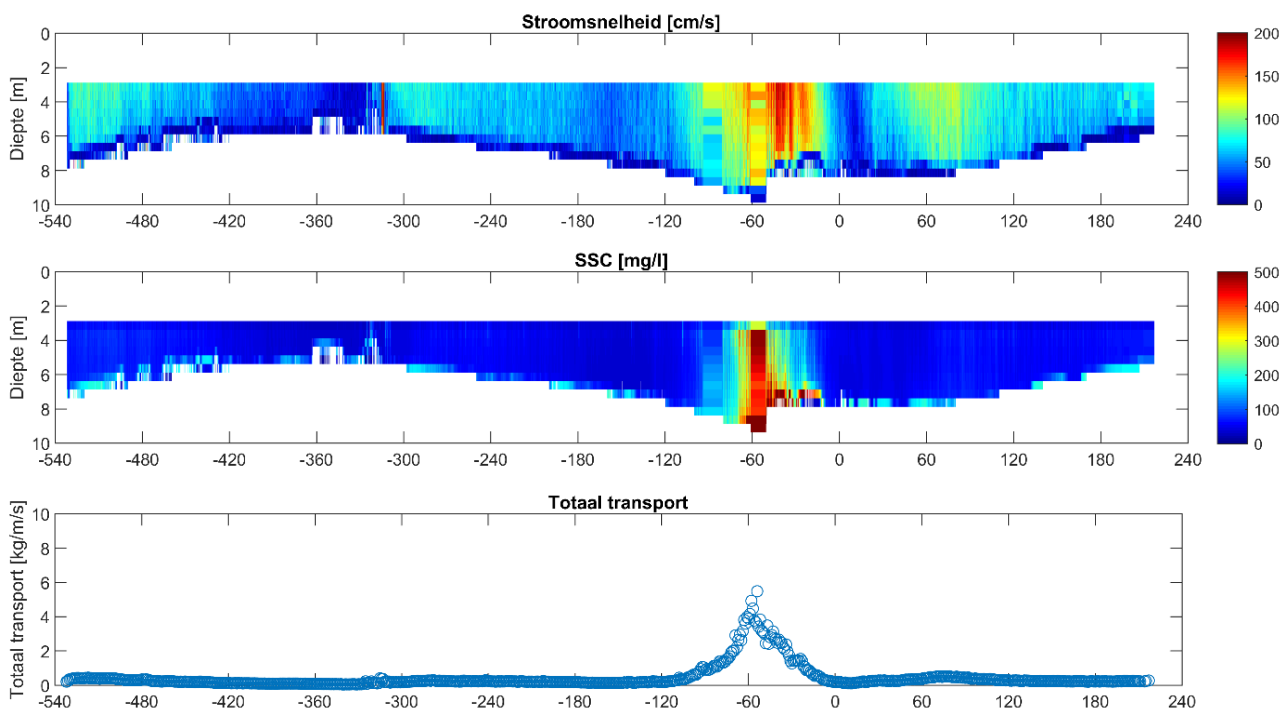


3.4.3 Sedimentconcentratie

Figuur 16 geeft het verloop van de afgeleide sedimentconcentratie (midden) en het totale (i.e. verticaal geïntegreerde) sedimenttransport weer tijdens de eerste meetdag. De sedimentconcentratie vertoont een gelijkaardig patroon als dit gemeten met de andere toestellen: gedurende het merendeel van het getij eerder beperkte (< 100 mg/l) sedimentconcentraties, die sterk toenemen in de periode tussen HW - 120' en HW - 60' (piekwaarde ~ 500 mg/l).

Dit patroon manifesteert zich ook in het totale sedimenttransport, waar op het moment van maximum vloed (HW - 60') een transport wordt bereikt van ca. 6 kg/s/m (breedte).

Figuur 16 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op meetdag 1 (28/08/2018) (x-as = tijd t.o.v. HW Hansweert [minuten])



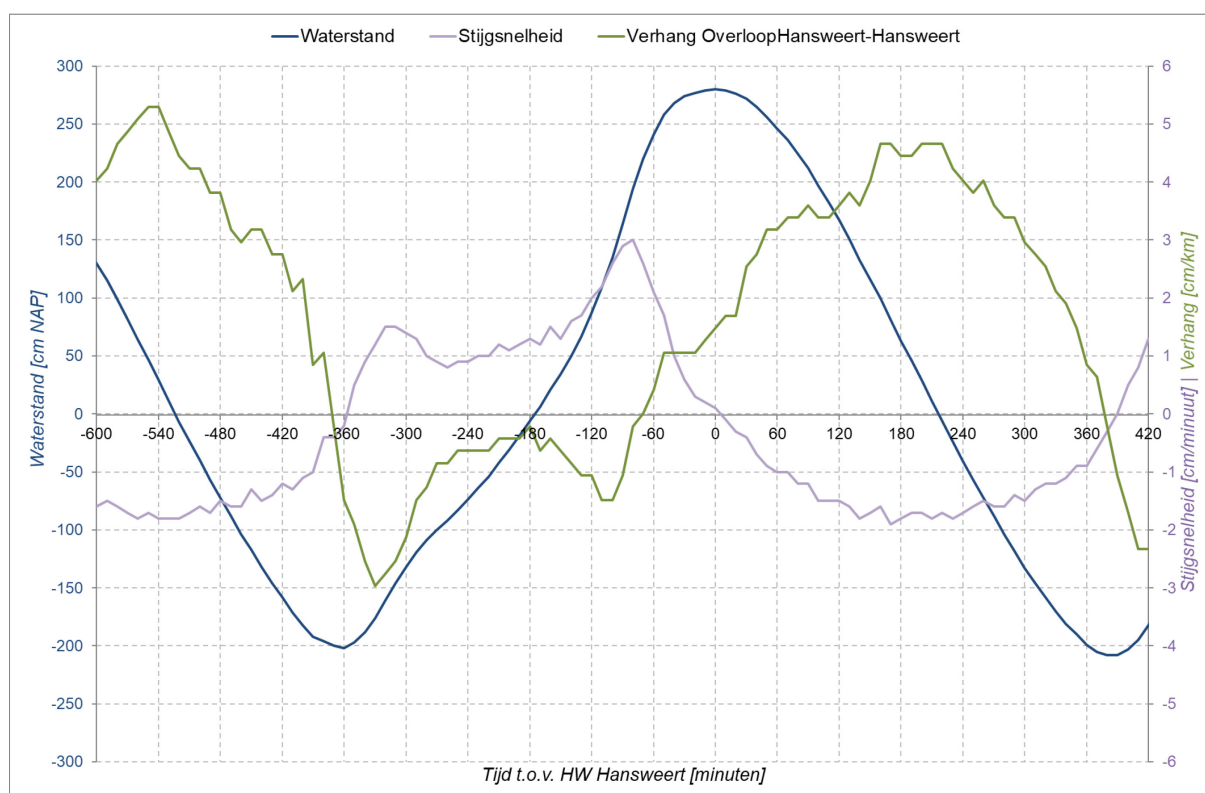
4 Resultaten dag 2 (29/08/2018)

In de volgende paragrafen worden de resultaten gepresenteerd per toestel. Bij de Delftse fles wordt onmiddellijk het sedimenttransport gemeten, terwijl bij de indirecte toestellen de sedimentconcentratie wordt afgeleid na kalibratie uit het gemeten signaal. Combinatie van de sedimentconcentratie met de snelheid laat toe het sedimenttransport te bepalen.

4.1 Waterstanden

Figuur 17 geeft het verloop van de waterstand te Hansweert weer. De stijging tijdens de meetdag bedroeg 482 cm, terwijl de daling 488 cm bedroeg. Ter vergelijking: over het decennium 2001-2010 bedroeg het gemiddeld getijverschil te Hansweert 441 cm, terwijl dit bij springtij 503 cm bedroeg (Vanlierde *et al.*, 2016).

Figuur 17 – Verloop waterstand, stijgsnelheid en verhang meetdag 2 (29/08/2018)



4.2 Delftse fles

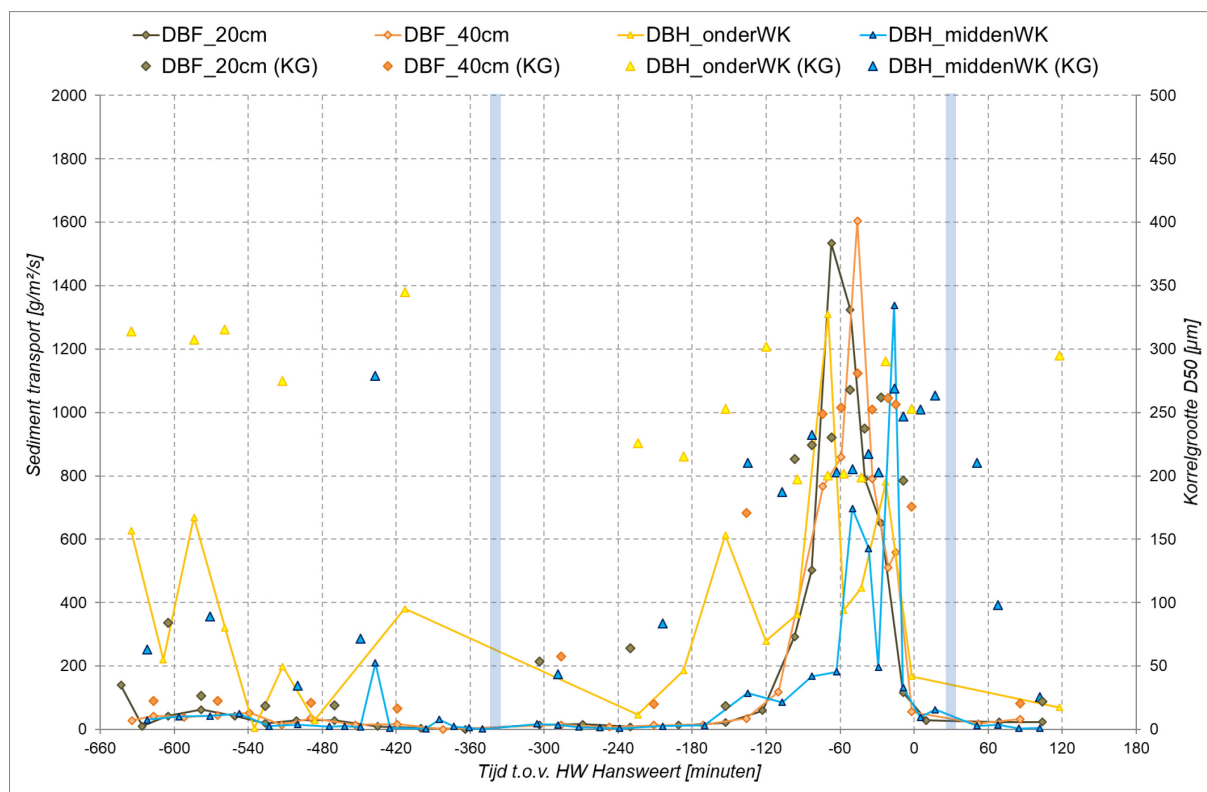
Net zoals op meetdag 1 werd zowel de Delftse fles op haar frame gebruikt voor het meten van het nabij-bodem transport (20 en 40 cm boven de bodem), als de opgehangen Delftse fles voor het suspensie transport. De opgehangen Delftse fles werd vooral in de onderste helft van de waterkolom gepositioneerd in de veronderstelling dat het sedimenttransport in de bovenste helft van de waterkolom minder uitgesproken is. Naast het sedimenttransport (direct afgeleid uit de sedimentvolumes afgevangen in de fles) werden voor een selectie van de monsters ook de korrelverdeling bepaald in de laboratorium.

Figuur 18 geeft het verloop weer van zowel het sedimenttransport op verschillende diepte, als de variatie van de mediane korrelgrootte (D50). Voor de opgehangen Delftse fles werden de stalen in de onderste zone (70-90%) van de waterkolom gegroepeerd (onderWK), alsook de overige stalen in de middelste zone (40-70%) van de waterkolom (middenWK). Er zijn geen metingen uitgevoerd in de bovenste 40% van de waterkolom.

Uit onderstaande figuur komt duidelijk de piek in het sedimenttransport naar voor ca. 60' voor hoogwater, op het moment dat de vloedstroming maximaal is (zie verder). Tijdens de overige fasen van getij is het sedimenttransport aanzienlijk lager. In het diepteprofiel worden de kleinste transporten steeds teruggevonden in de middelste zone van de waterkolom en zal vermoedelijk nog hoger het transport verder afnemen. Opmerkelijk is wel dat, net zoals op meetdag 1, de hoogste transporten worden teruggevonden in de onderste suspensie zone (70-90% van de waterkolom).

De mediane korrelgrootte vertoont op de meeste dieptes een variatie binnen de getijcyclus: gedurende de laatste fase van de eb en het begin van de vloed (HW-420' tot HW-120') is er vooral silt en (zeer) fijn zand teruggevonden. Tijdens de maximale vloedstroming (HW-120' tot HW) en het begin van de eb fase (HW tot HW+180') is bestaat het getransporteerd sediment uit matig grof zand (D50 ~ 200-300 µm).

Figuur 18 – Verloop sedimenttransport en D50 op basis van Delftse fles tijdens meetdag 2 (29/08/2018)
 DBF = Delftse fles op frame | DBH = opgehangen Delftse fles | WK = waterkolom | KG = korrelgrootte



4.3 Aanderaa Seaguard 2500

Dit toestel was gemonteerd op het frame van de Delftse fles. Dit frame staat gedurende een bepaalde tijd (ca. 5') op de bodem, om vervolgens aan boord gehesen te worden voor het verzamelen van het opgevangen sediment in de Delftse fles. Aangezien het Aanderaa Seaguard toestel continu registreerde, moeten de geregistreeerde waarden wanneer het toestel zich uit het water bevond, verwijderd worden. Hiertoe werden alle metingen waarvoor de druk overeenkwam met minder dan 1 m water, verwijderd. Daarnaast werden ook alle metingen verwijderd geregistreerd tijdens het ophalen en neerlaten van het frame (op basis van drukverschil tussen 2 metingen). Tenslotte werden de metingen nog aan een visuele check onderworpen om eventuele afwijkende metingen te verwijderen.

4.3.1 Stroming

Figuur 19 geeft het verloop van de stroomsnelheid weer gemeten door de Aanderaa Seaguard, gemonteerd op het frame van de Delftse fles. Ter vergelijking werden ook de diepte-gemiddelde snelheden gemeten met de ADCP (zie § 4.5.1) toegevoegd aan deze figuur. Tijdens de vloedfase blijft de snelheid initieel (HW - 300' tot HW-120') beperkt 60 cm/s. Vervolgens neemt de snelheid snel toe tot 140 cm/s op ca. HW - 60'. In de eb fase blijft de snelheid beperkt tot maximaal 60 cm/s om vervolgens geleidelijk af te nemen (ca. 20 cm/s op HW - 540'). Dit patroon is gelijkaardig met dit gemeten door de ADCP. Enigszins opvallend is het beperkte verschil in grootte tussen de diepte-gemiddelde snelheid (ADCP) en de snelheid op 50 cm van de bodem (Aanderaa). Dit wijst erop dat de opbouw van de snelheid in een zeer beperkte zone nabij de bodem (onderste 50 cm) gebeurt, wat aanleiding geeft tot grote bodemschuifspanningen (~ verticale gradiënt van de stroomsnelheid).

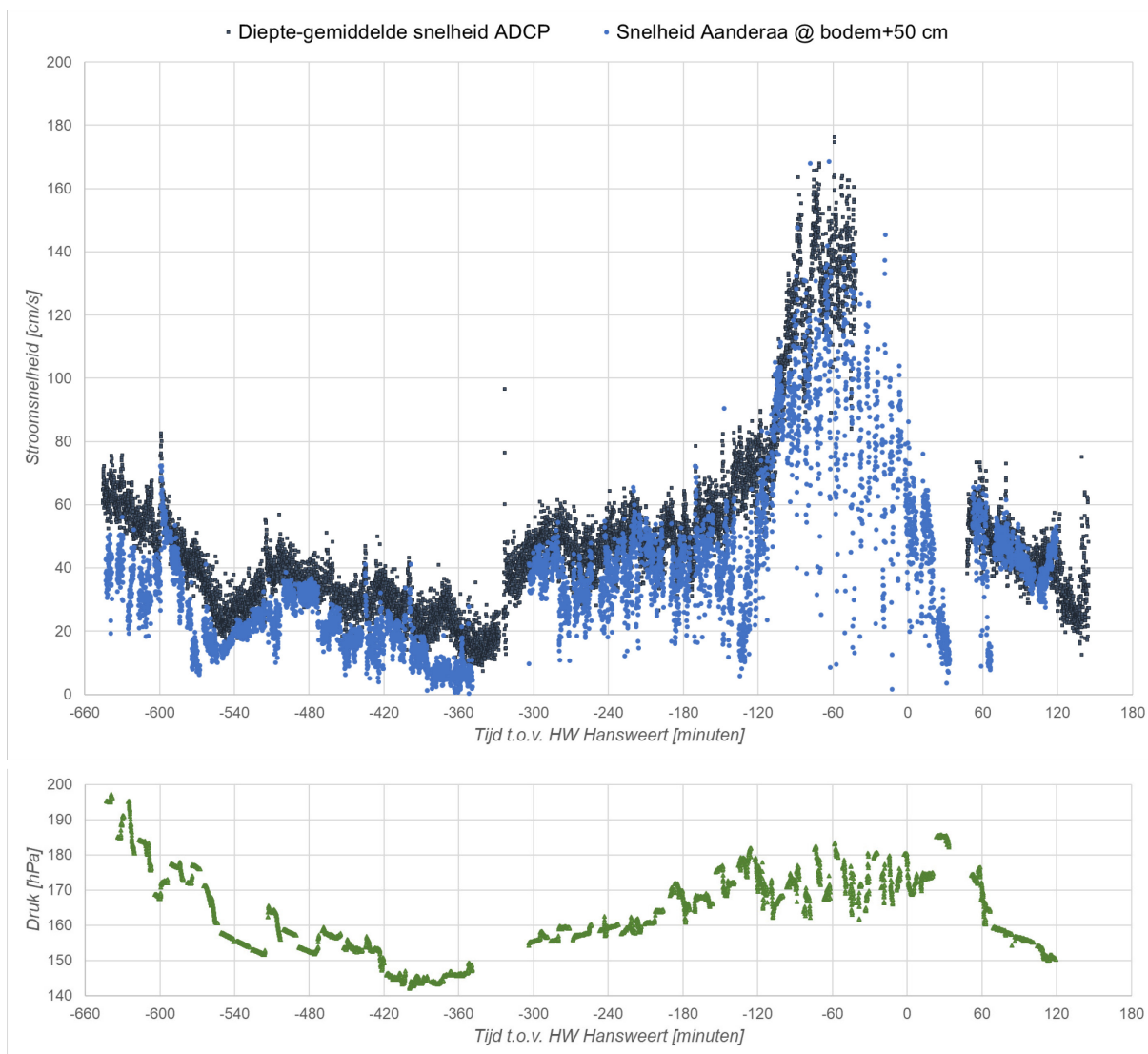
4.3.2 Kalibratie

Er werden geen specifieke stalen genomen voor de kalibratie van de turbiditeit gemeten met de Aanderaa Seaguard. Wel kan aan de hand van de gemeten sedimenttransporten met de Delftse fles, een sedimentconcentratie bepaald worden door het gemeten transport te delen door de stroomsnelheid gemeten met de Aanderaa Seaguard. Aangezien het sedimenttransport gemeten met de Delftse fles een waarde is over de periode dat de fles onderwater is, werden de turbiditeit en de stroomsnelheid gemiddeld over hetzelfde tijdsinterval. Figuur 20 geeft de relatie weer tussen deze turbiditeit en de afgeleide sedimentconcentratie. Er is gekozen voor een exponentiële relatie omwille van de spreiding van de punten.

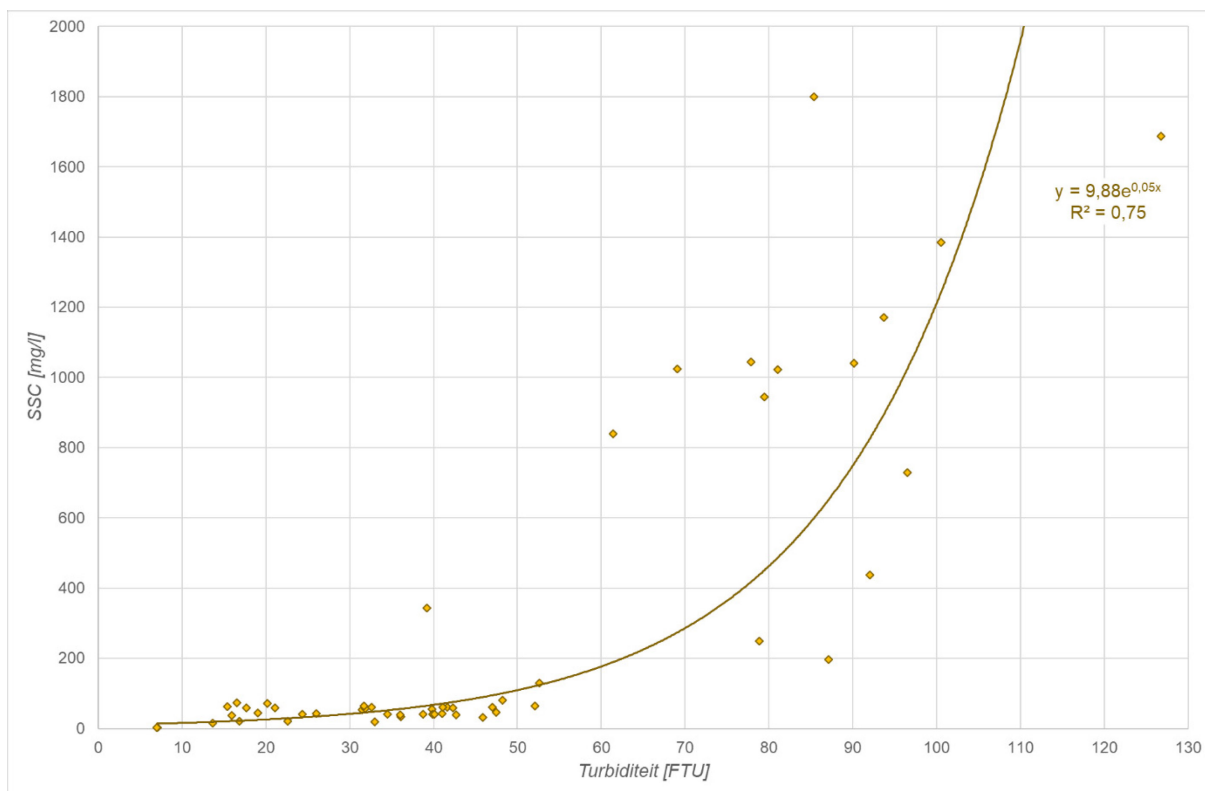
4.3.3 Sedimentconcentratie

Figuur 21 geeft het verloop van de afgeleide sedimentconcentratie tijdens de tweede meetdag. De sedimentconcentratie vertoont een gelijkaardig patroon als dit gemeten met de andere toestellen: gedurende het merendeel van het getij eerder beperkte (< 100 mg/l) sedimentconcentraties, die sterk toenemen in de periode tussen HW - 120' en HW - 60' (piekwaarde ~ 1000 mg/l). Daarnaast is er een tweede piek in het begin van de eb fase (HW - 630' tot HW - 540') waar concentraties tot 600 mg/l worden vastgesteld. Hoewel dit patroon ook optreedt bij de LISST-100X (zie volgende paragraaf), is de absolute waarde van deze piek opvallend hoog. Die kan toegeschreven aan de exponentiële kalibratiecurve die gekozen werd en waarschijnlijk in het begin van de eb fase niet gerechtvaardigd is: uit de verhouding tussen de massa- en volumeconcentratie (Figuur 10) blijkt dat gedurende het begin van de eb fase deze verhouding aanzienlijk lager is dan tijdens de maximale vloedfase; deze verhouding wordt echter niet expliciet meegenomen in de kalibratie van de turbiditeit van de Aanderaa. Indien deze lagere densiteit wel zou worden meegenomen, zal dit automatisch resulteren in een lagere sedimentconcentratie (Sutherland *et al.*, 2000).

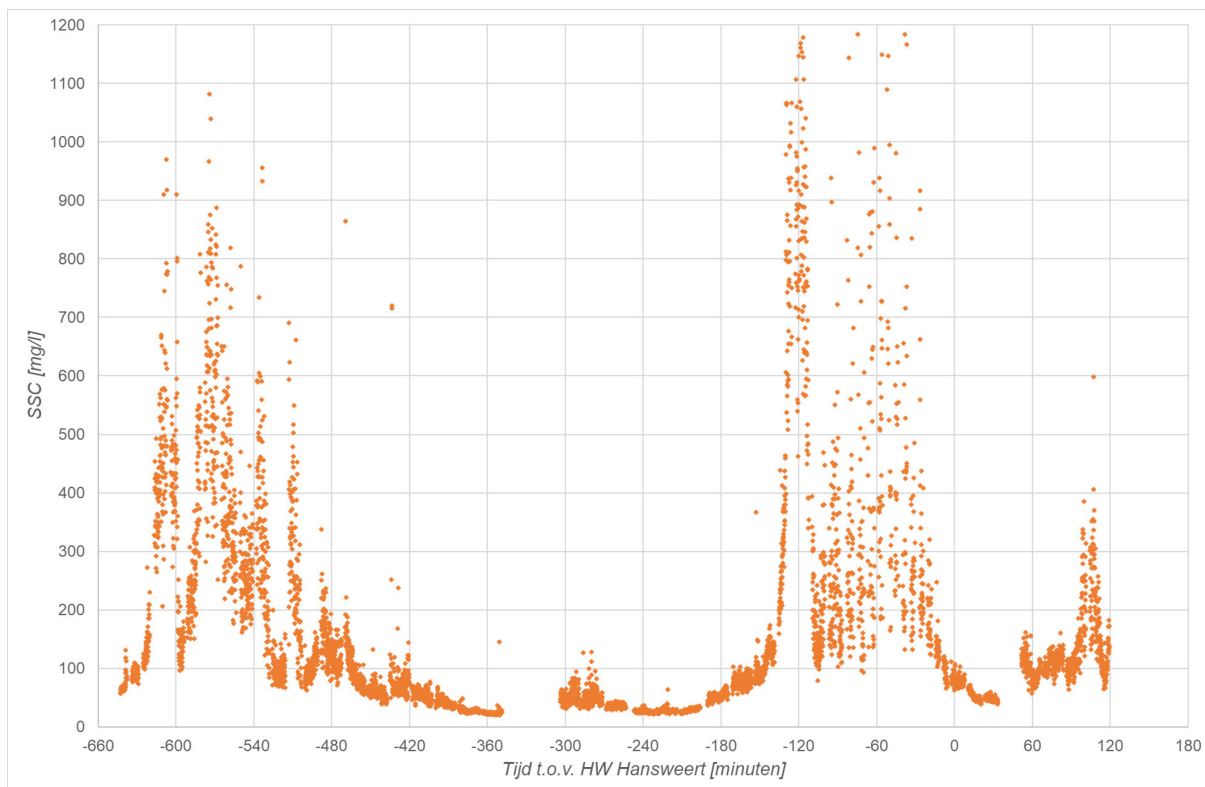
Figuur 19 – Verloop stroomsnelheden (boven) en druk Aanderaa (onder) tijdens meetdag 2 (29/08/2018)



Figuur 20 – Relatie turbiditeit en sedimentconcentratie Aanderaa tijdens meetdag 2 (29/08/2018)



Figuur 21 – Verloop sedimentconcentratie Aanderaa tijdens meetdag 2 (29/08/2018)



4.4 LISST-100

De LISST-100 was bevestigd op het meetframe dat gedurende de volledige meetdag in de waterkolom hing. De intentie was om steeds in de onderste helft van de waterkolom te meten, waarvoor het frame op regelmatige tijdstippen gevierd (periode LW => HW) of opgehaald ((periode HW => LW) werd. Deze variatie is terug te vinden in Figuur 22 (boven) waar de druk wordt weergegeven. De variatie bedraagt ca. 7 hPa gedurende de volledige meetdag, wat neerkomt op ca. 7 m variatie in verticale positie in de waterkolom.

4.4.1 Sedimentconcentratie

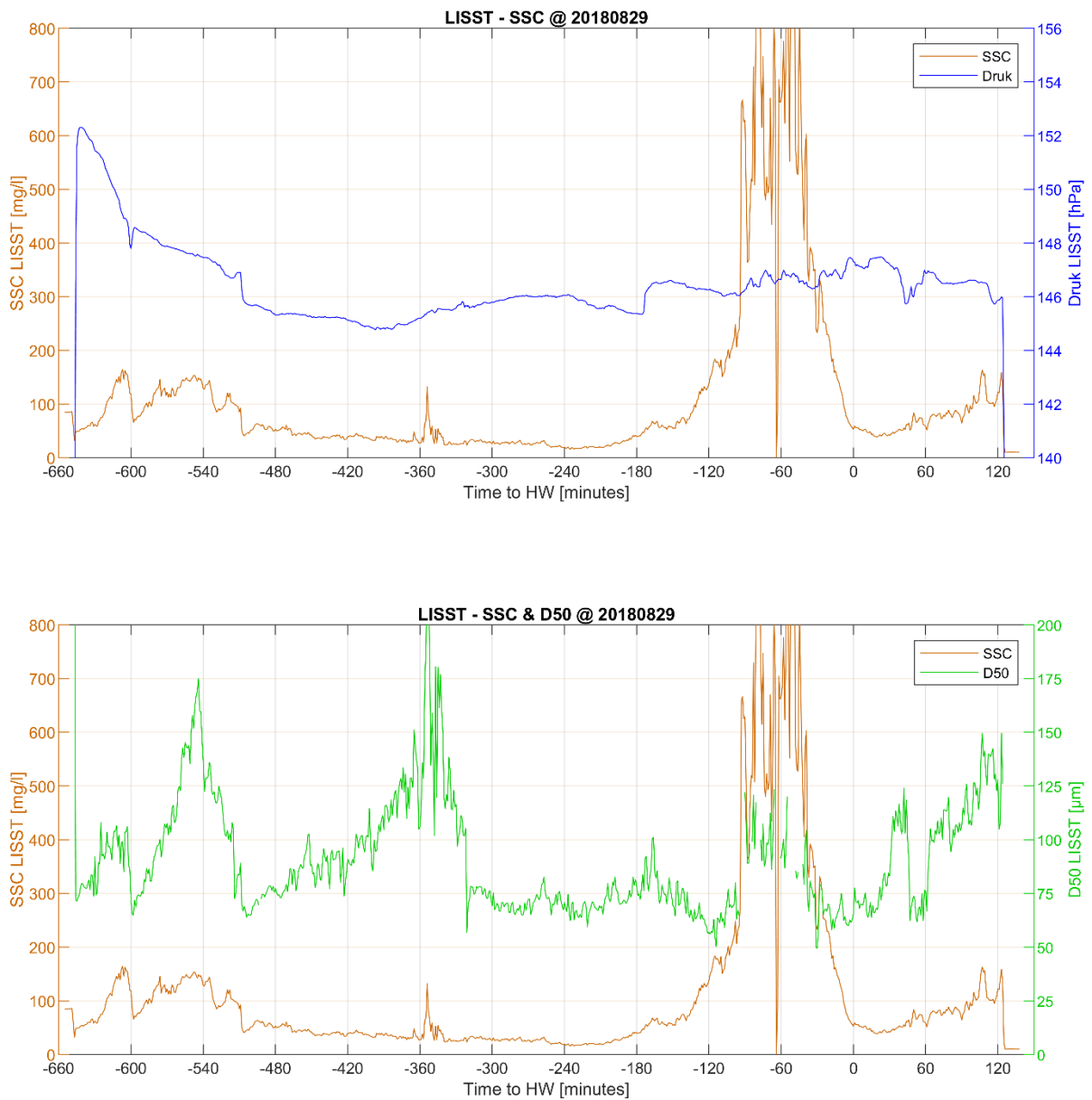
In § 3.3.1 is de kalibratie besproken van de LISST-100 die gehanteerd wordt voor beide meetdagen. De gepresenteerde sedimentconcentraties maken ook gebruik van deze kalibratie.

Figuur 22 geeft het verloop van de afgeleide sedimentconcentratie en de mediane korrelgrootte (D50) weer tijdens de tweede meetdag. De sedimentconcentratie vertoont ook hier een gelijkaardig patroon als dit gemeten met de Delftse fles: gedurende het merendeel van het getij eerder beperkte (~ 50 mg/l) sedimentconcentraties, die sterk toenemen in de periode tussen HW-120' en HW (piekwaarde ~ 800 mg/l); een beperkte verhoging (tot 150 mg/l) is waar te nemen tijdens de ebfase (HW - 630' tot HW - 510').

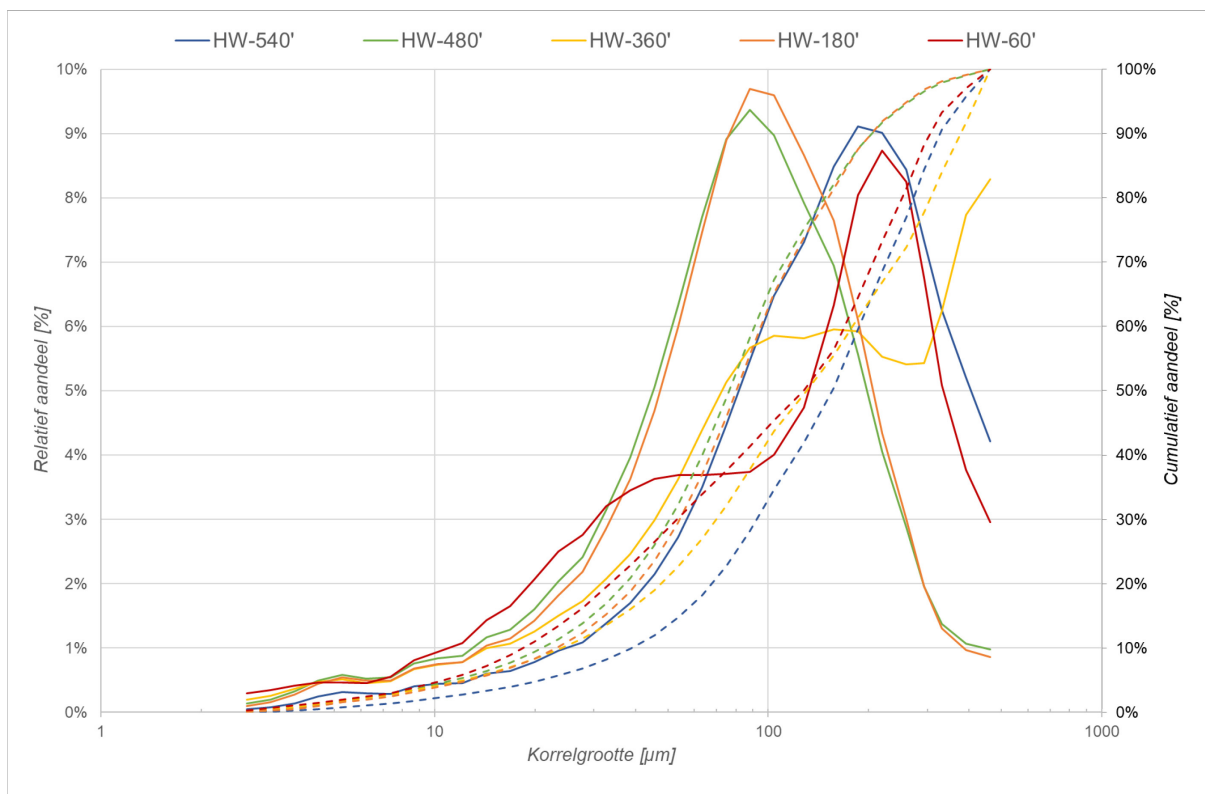
De mediane korrelgrootte een aanzienlijke variatie: in het begin van de ebfase (HW - 600' tot HW - 510') treedt een toename gevolgd door een afname van de mediane korrelgrootte op (van 75 µm naar 175 µm en terug naar 75 µm); een gelijkaardig patroon treedt ook op op het einde van de ebfase (HW - 480' tot HW - 300'); uit Figuur 10 kan afgeleid worden dat de verhouding van de massa- tot volumeconcentratie hier klein is, wat duidt op de aanwezigheid van vlokken; gedurende de vloedfase is de mediane korrelgrootte eerder constant (~ 75 µm) om toe te nemen (tot ca. 125 µm) tijdens de maximum vloedfase; in deze periode is wel een toename van de verhouding van de massa- tot volumeconcentratie (Figuur 10), wat duidt op de aanwezigheid van primaire partikels (fijn zand).

Figuur 23 toont de korrelverdeling op een aantal momenten tijdens de getijcyclus. De korrelverdeling op de momenten van kleine mediane korrelgrootte (HW - 480' en HW - 180') geven een gelijkaardige korrelverdeling. De drie momenten met een grotere mediane korrelgrootte hebben een sterk afwijkend verloop: het moment van maximum vloed (HW - 60') geeft enerzijds een groter aandeel fijne fractie (< 63 µm) en anderzijds een belangrijke fractie met D50 van ca. 220 µm, die overeenkomt met het zand dat ook in de Delftse fles is teruggevonden; de twee momenten tijdens de ebfase worden gekenmerkt door een de aanwezigheid van vlokken, waarbij vooral op het momenten van kentering laagwater (HW - 360') grote (> 300 µm) vlokken terug te vinden zijn.

Figuur 22 – Verloop sedimentconcentratie en druk (boven) en D50 (onder) op basis van LISST-100 tijdens meetdag 2 (29/08/2018)



Figuur 23 – Korrelverdeling op basis van LISST-100 voor verschillende momenten tijdens meetdag 2 (29/08/2018)



4.5 ADCP

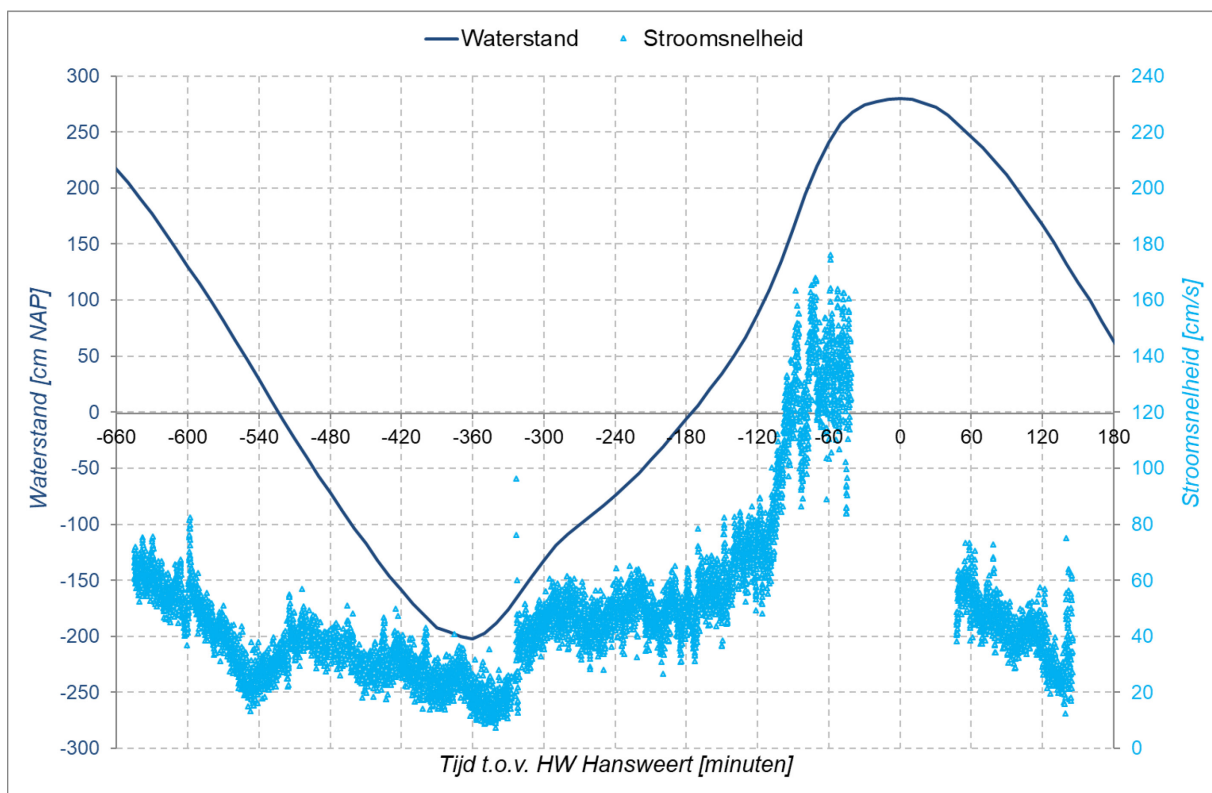
Tijdens de meting bleek op het moment van maximum vloed de stroming dermate sterk dat het meetschip niet op positie kon gehouden worden door het anker. De schipper slaagde erin de positie te behouden door het gebruik van de motor, maar door de invloed van de schroef in combinatie met sterke stroming en sterke golfslag, bleek het ADCP-signaal verstoord in de periode rond hoogwater, waardoor geen bruikbare resultaten beschikbaar zijn.

4.5.1 Stroming

Figuur 24 geeft het verloop van de diepte-gemiddelde stroomsnelheid weer, bepaald uit de ADCP-metingen. Figuur 26 (boven) geeft het verloop van de stroomsnelheid weer over het volledige bemeten verticale profiel. Voor het bepalen van het gemiddelde werd geen extrapolatie uitgevoerd naar de bodem (side-lobe effect) of het wateroppervlak (blanking distance). Tijdens de vloedfase blijft de snelheid initieel (HW - 300' tot HW-180') beperkt tot 60 cm/s. Vervolgens neemt de snelheid snel toe tot 160 cm/s op ca. HW - 60'. In de ebfase blijft de snelheid beperkt tot maximaal 60 cm/s om vervolgens geleidelijk af te nemen (ca. 20 cm/s op HW - 540'). Opmerkelijk is dat de stroming nadien stijgt om terug af te nemen naar de kentering (HW - 330').

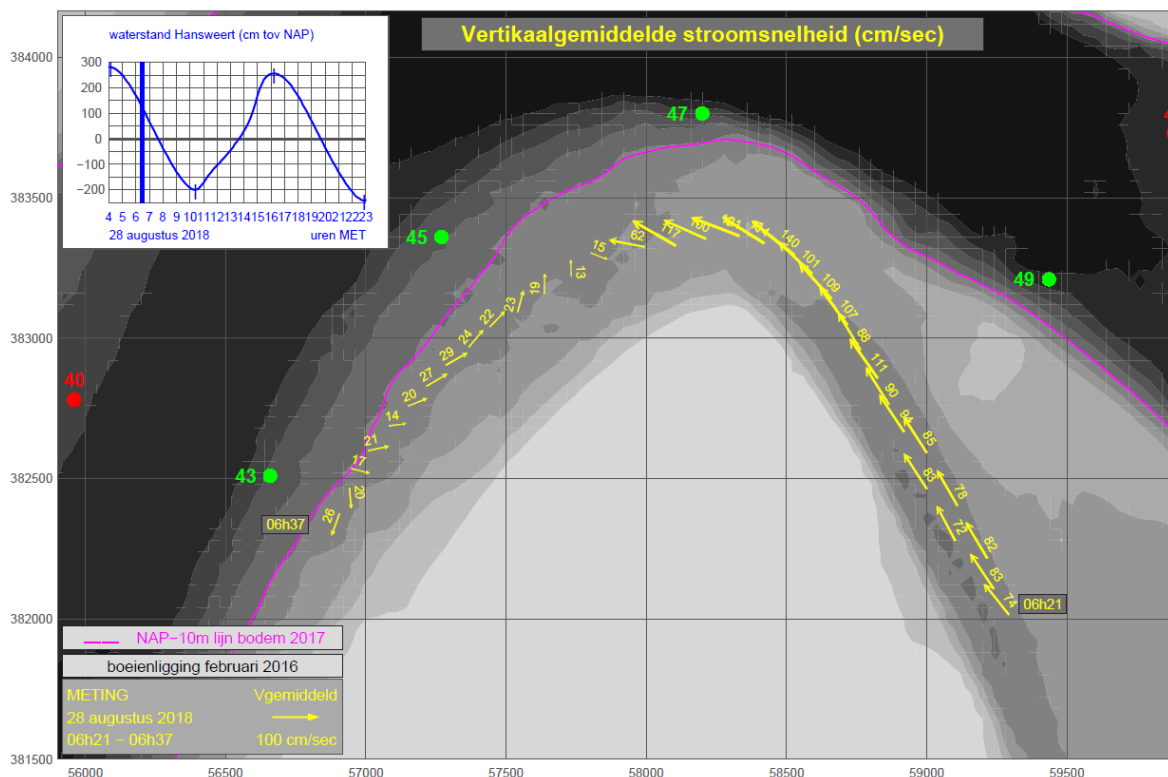
Het patroon hangt samen met de neervorming langs westrand van de Platen van Ossensisse tijdens de ebfase. Dit komt ook naar voor in de diepte-gemiddelde snelheid op basis van de varende meting (uitgevoerd door Rijkswaterstaat, Figuur 25).

Figuur 24 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid op meetdag 1 (28/08/2018)



Figuur 25 – Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid uit varende meting op meetdag 1 (28/08/2018)
Bron: Rijkswaterstaat Zee en Delta

Plaats van Ossenisse dinsdag 28 augustus 2018 06h21 – 06h37

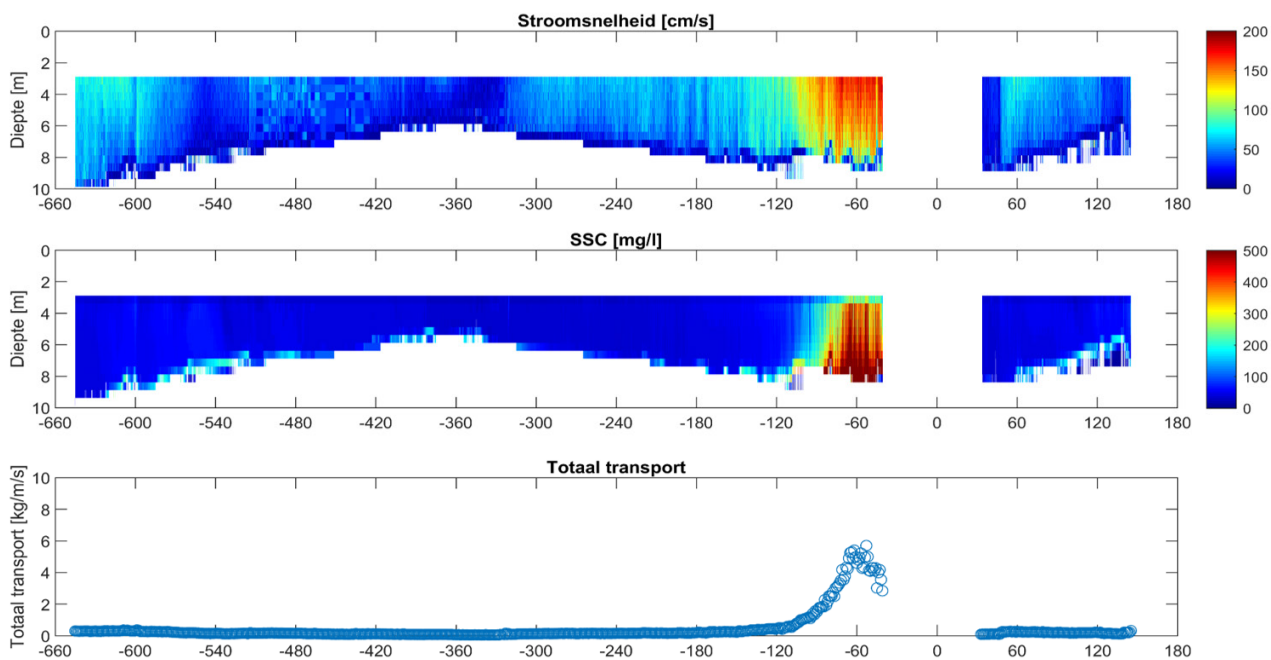


4.5.2 Sedimentconcentratie

In § 3.4.2 is de kalibratie besproken van de akoestische backscatter van de ADCP die gehanteerd wordt voor beide meetdagen. De gepresenteerde sedimentconcentraties maken ook gebruik van deze kalibratie. Figuur 26 geeft het verloop van de afgeleide sedimentconcentratie (midden) en het totale (i.e. verticaal geïntegreerde) sedimenttransport weer tijdens de tweede meetdag. De sedimentconcentratie vertoont een gelijkaardig patroon als dit gemeten met de andere toestellen: gedurende het merendeel van het getij eerder beperkte (< 100 mg/l) sedimentconcentraties, die sterk toenemen in de periode tussen HW - 120' en HW - 60' (piekwaarde ~ 500 mg/l).

Dit patroon manifesteert zich ook in het totale sedimenttransport, waar op het moment van maximum vloed (HW - 60') een transport wordt bereikt van ca. 6 kg/s/m (breedte).

Figuur 26 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op meetdag 2 (29/08/2018) (x-as = tijd t.o.v. HW Hansweert [minuten])



5 Totaal sedimenttransport

In § 3.4.3 en § 4.5.2 is het totale sedimenttransport gepresenteerd op basis van de ADCP-meting. Ter vergelijking van deze waarde, die gebaseerd is op een kalibratie van cABS en sedimentconcentratie, zonder expliciet onderscheid tussen het zand en slibaandeel, kan ook uit de gemeten sedimenttransporten met de Delftse fles een totaal transport afgeleid worden. Hiervoor kan de gemeten waarde van het sedimenttransport (bij de Delftse fles hoofdzakelijk zandtransport), gecombineerd worden met een bepaald verticaal profiel van het (relatieve) sedimenttransport. De gebruikte methodologie en de resultaten worden hieronder beschreven.

5.1 Methodologie

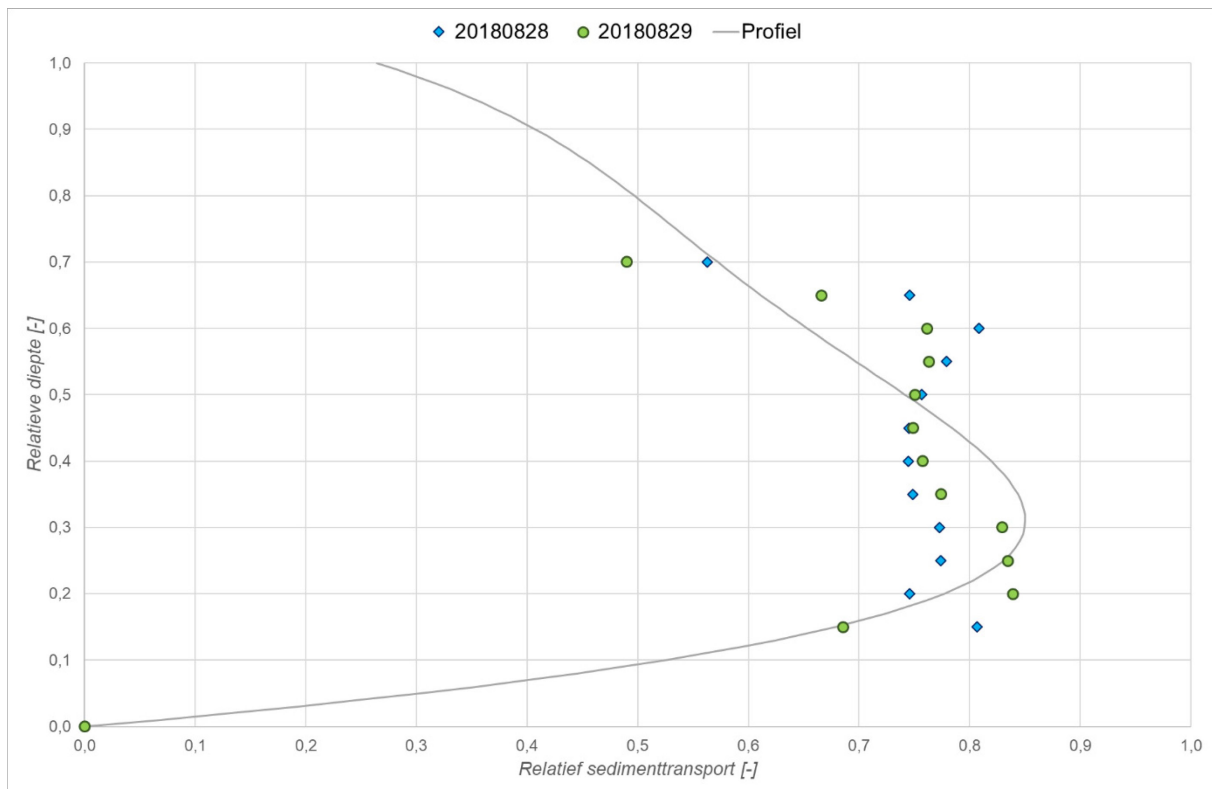
Met behulp van de Delftse fles werd het sedimenttransport (voornamelijk zand) gemeten op een beperkt aantal hoogtes: 2 hoogtes nabij de bodem met de Delftse fles op frame, enkele hoogte in de onderste helft van de waterkolom met de opgehangen Delftse fles. In eerdere studies (Plancke *et al.*, 2014, 2018b) werd een verticaal profiel van de relatieve sedimentconcentratie bepaald op basis van de metingen met de Delftse flessen. Bij deze meetcampagne bleek het, door een beperkte spreiding van de metingen in de verticale, niet mogelijk om dezelfde werkwijze te hanteren. Daarom werd gebruik gemaakt van een andere methode, gebaseerd op het verticale profiel van het sedimenttransport bepaald met de ADCP. Volgende stappen werden toegepast voor het bepalen van het relatieve verloop van het verticale profiel van het sedimenttransport:

1. Beperken tot de periode van maximum vloed, omwille van het dominante zandtransport in deze periode van het getij
2. Bepalen van het relatieve sedimenttransport in functie van de relatieve diepte: hiertoe werd het afgeleide sedimenttransport gedeeld door de maximale waarde uit het betreffende verticale profiel; de positie van de meting werd herleid naar een relatieve diepte door te delen door de waterdiepte
3. Interpoleren van de relatieve diepte (gemeten) naar een profiel/diepteklassen met regelmatig interval (stap van 0,05)
4. Per diepteklasse werd het 50%-percentiel bepaald van alle relatieve sedimenttransporten in de periode van maximum vloed (op beide meetdagen apart); het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 27
5. Een vierdegraadskromme¹ werd door de puntenkoppels (relatieve diepte, relatief sedimenttransport met toevoeging punt [0,0] aangezien op de bodem het transport nul wordt) gefit om het verticaal profiel weer te geven; opgemerkt kan worden dat dit profiel overeenstemming vertoont met het theoretische verloop bekomen uit een logaritmische snelheidsverdeling en Rouse-profiel voor de sedimentconcentratie;

Vervolgens werd deze kromme gebruikt om op basis van de metingen met de Delftse fles een totaal transport te bepalen. Hiertoe werd de meetdiepte van de Delftse fles relatief gemaakt en werd het gemeten sedimenttransport als factor gebruikt om het verticaal profiel van het relatief sedimenttransport om te vormen in absolute waarden. Dit werd tenslotte geïntegreerd over de volledige diepte om het totaal sedimenttransport te bekomen.

¹ Theoretisch zou dit profiel de combinatie moeten zijn van een logaritmischesnelheidsprofiel en het Rouse-profiel voor sedimentconcentratie. Er is echter gekozen voor een pragmatische benadering waarbij de 4^e graadskromme de beste overeenstemming gaf.

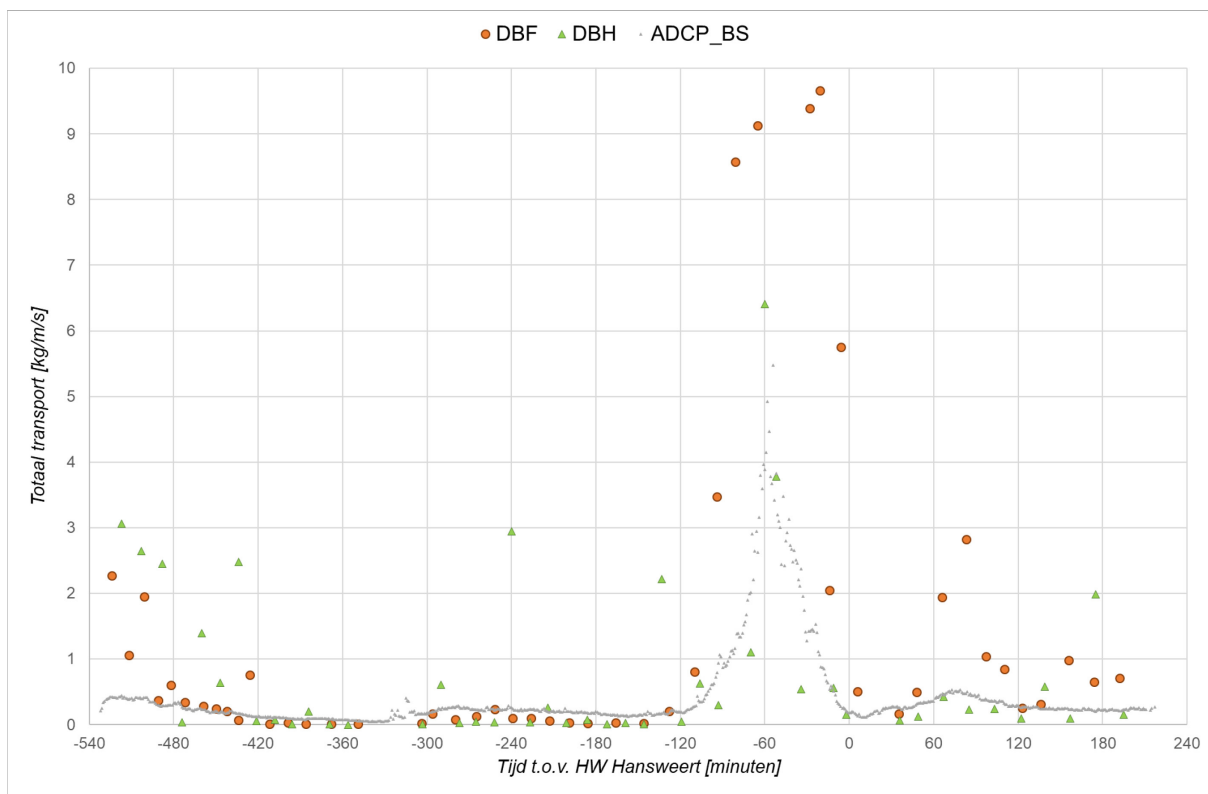
Figuur 27 – Relatief verloop sedimenttransport over de verticale
Opmerking: punt [0,0] werd aan de meetpunten toegevoegd



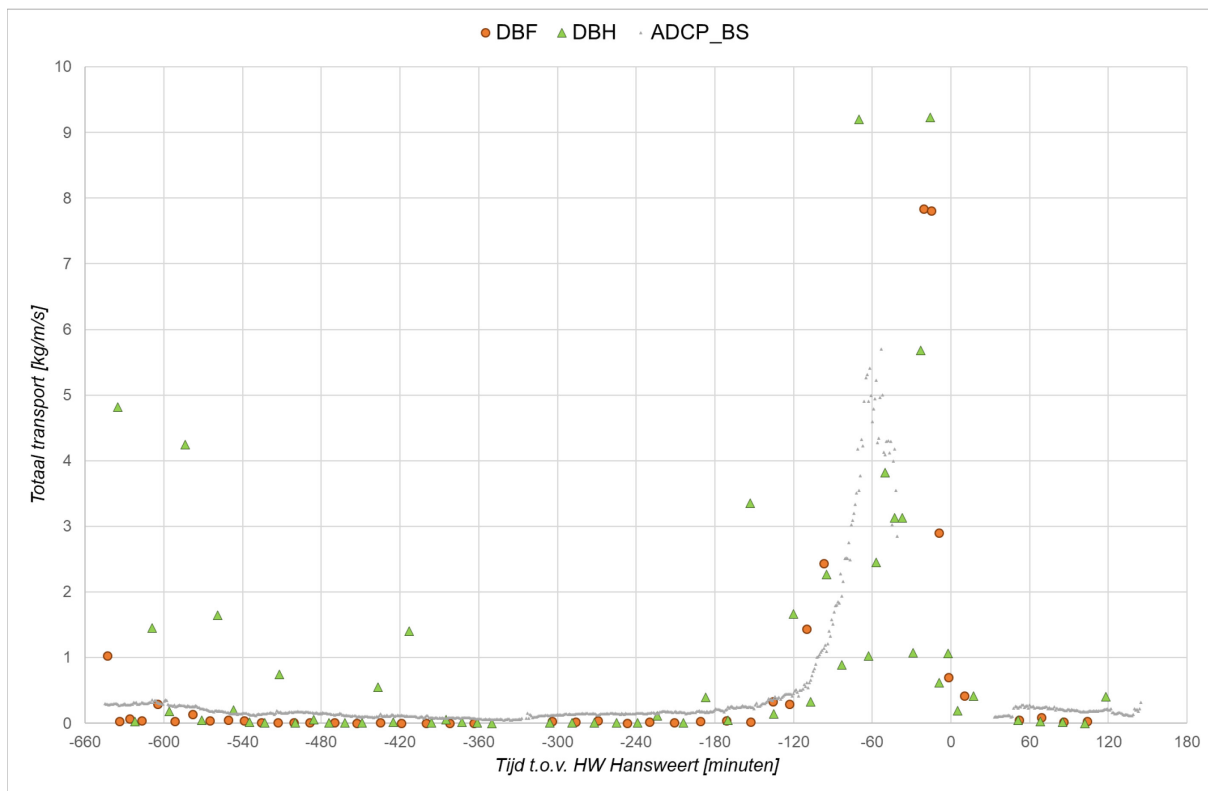
5.2 Resultaten

Figuur 28 (meetdag 1) en Figuur 29 (meetdag 2) geven het verloop weer van het totale sedimenttransport afgeleid uit zowel de ADCP-metingen als de metingen met de Delftse fles. Het verloop is voor beide meetdagen gelijkaardig: beperkte transporten tijdens de eb fase en het begin van de vloed fase, sterke transport rond de periode van maximale vloedstroming (HW – 60'). Ook de verschillende berekeningswijzen geven een vergelijkbaar patroon weer, mits enkele verschillen: tijdens de eerste meetdag geven de berekeningen op basis van de Delftse fles aanleiding tot grotere transporten tijdens de eb fase, vooral deze gebaseerd op de Delftse fles op frame; tijdens de tweede meetdag is dit verschil beperkter. Ook bij maximum vloed liggen de transport met de Delftse fles hoger dan deze bepaald uit de backscatter en de stroming van de ADCP.

Figuur 28 – Verloop diepte-geïntegreerd sedimenttransport op meetdag 1 (28/08/2018)



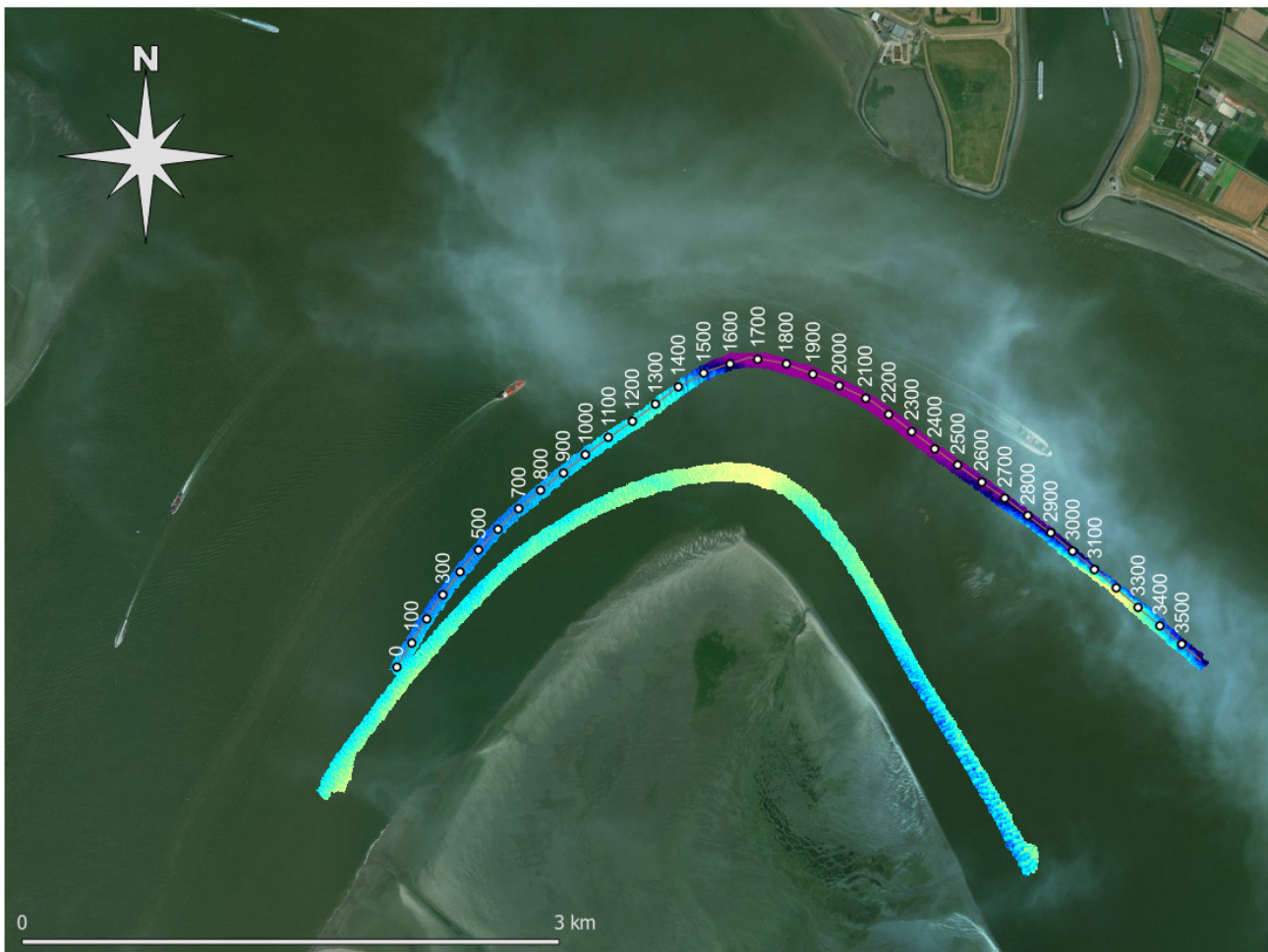
Figuur 29 – Verloop diepte-geïntegreerd sedimenttransport op meetdag 2 (29/08/2018)



6 Duinmigratie

Tijdens de eerste meetdag werden door Rijkswaterstaat varende ADCP en multibeam echo-sounder (MBES) raaien gevaren nabij de rand van de Platen van Ossensisse. Enerzijds werd op 3 momenten in de getijcyclus (nl. kentering hoogwater bij aanvang van de meting, kentering laagwater en kentering hoogwater op het einde van de meting) een opname uitgevoerd van een raai (noordelijke raai, “Raai 2” – zie Figuur 30) die deels (raaien 5 tot en met 15) samenvalt met de meetraai uit Plancke *et al.* (2018). Daarnaast werd hoogfrequent (i.e. tussentijd van ca. 30’) een andere raai (zuidelijk, “Raai 1” – zie Figuur 30) opgemeten. De doelstelling van deze metingen is het sedimenttransport in beeld te brengen tijdens één getijcyclus op basis van de migratie van bodemvormen.

Figuur 30 – Ligging meetraaien MBES: Raai 1 (zuidelijk) en raai 2 (noordelijk, met afstand langsprofiel)

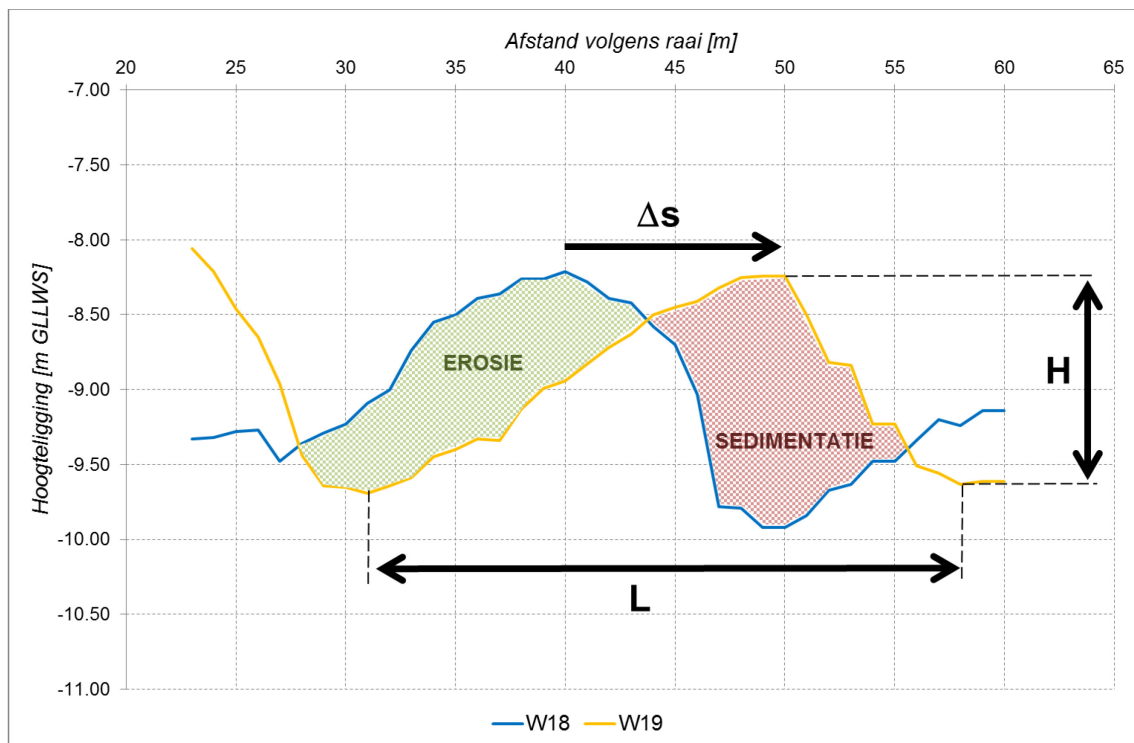


6.1 Methodologie

In Plancke *et al.* (2018) werden de sedimenttransporten bepaald uit de migratie van de bodemvormen gebruik makend van zowel de migratiesnelheid van de individuele duinen, als de volumeverschillen. Binnen voorliggend rapport is ervoor geopteerd om enkel gebruik te maken van de volumeverschillen (Berben *et al.*, 1978) aangezien de migratiesnelheid op basis van één getijfase moeilijk te bepalen is (zeer kleine afstandsverschillen van toppen).

Tussen 2 opeenvolgende peilingen zal de bodemvorm zich verplaatsen, waarbij er aan de loefzijde een hoeveelheid sediment geërodeerd wordt, terwijl er zich aan de leizijde een hoeveelheid sediment afzet. Dit is weergegeven in Figuur 31. Het geërodeerde volume (groen) en het afgezette volume (rood) zijn een maat voor het bodemtransport.

Figuur 31 – Overzicht parameters gebruikt voor het berekenen van het bodemtransport

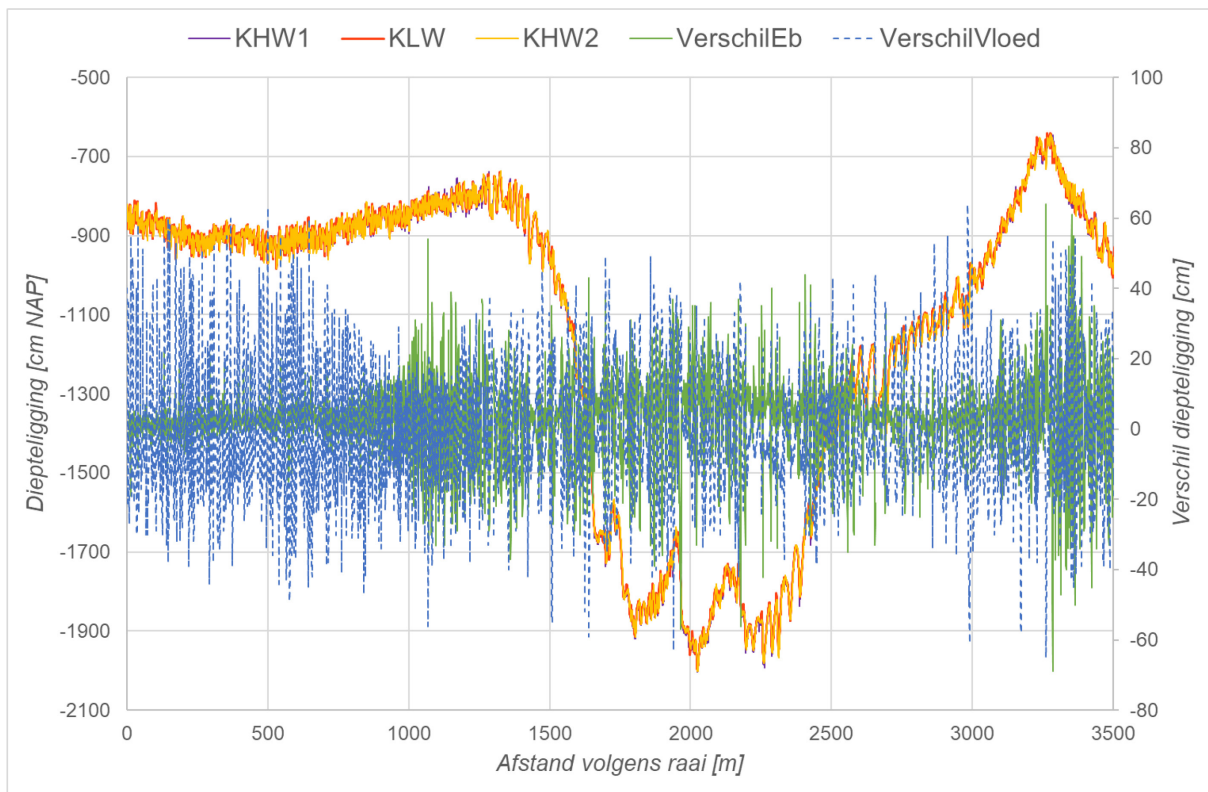


Langsheen het profiel wordt het hoogteverschil tussen 2 peilingen bepaald (verschil tussen hoogtemeting uit MBES, zie Figuur 32 en detail in Bijlage A – Bodemvormen). Vervolgens worden de snijpunten met de 0-waarde bepaald, en worden hiertussen de geërodeerde en afgezette sedimentvolumes per eenheidsbreedte bepaald. Vervolgens kan hieruit het bodemtransport berekend worden:

$$q_b = \frac{\langle \Delta V \rangle}{\Delta t} = \frac{\text{gemiddelde volume sediment dat geërodeerd of afgezet is}}{\text{tijd tussen 2 peilingen}} \quad (1)$$

De berekende bodemtransporten (enerzijds afzonderlijk geërodeerd (positief, omwille van conventie dat diepte positief is) en afgezet (negatief) volumes per eenheidsbreedte, als het gemiddelde van de absolute waarde beide) worden vervolgens samengevat per deelsectie van 250 m van het langsprofiel (door middel van verschillende (o.a. 10, 50 en 90%) percentielen). Dit resulteert o.a. in een mediane (P50) waarde voor het bodemtransporten langs het profiel op basis van de verplaatste sedimentvolumes.

Figuur 32 –Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen 2 opeenvolgende getijfasen

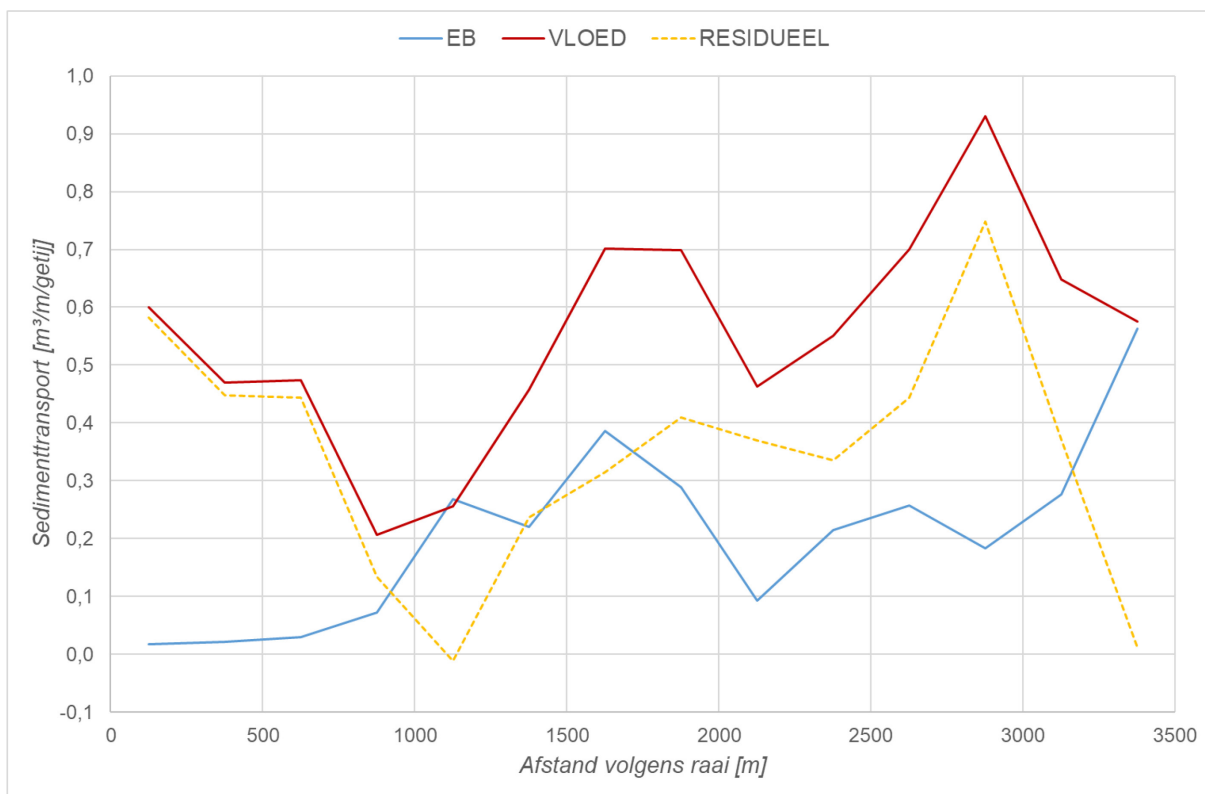


6.2 Resultaten

Figuur 33 geeft het afgeleide sedimenttransport weer per deelsectie van 250 m langsheen raai 2. Langsheen het merendeel van de raai is het sedimenttransport vloed-dominant. Enkel ter hoogte van de zone op 1000-1250 m en het laatste deel is het vloedtransport en het ebtransport quasi gelijk.

Wanneer een vergelijking gemaakt wordt met de eerdere berekening, die gebaseerd is op wekelijkse peilingen over een periode van 4 weken (zie Figuur 2), komt het patroon in sedimenttransport zeer goed overeen: raai 5 (0-500 m) kende een hoger transport ten opzichte van de volgende raaien, wat ook in deze meting (500 – 1250 m) teruggevonden wordt. Vervolgens neemt het sedimenttransport toe om te pieken tussen 2500 en 3000 m. Dit komt overeen met raaien 12 en 13, waar eveneens de grootste transport werden berekend in de eerdere metingen. Eén belangrijk verschil is echter wel de grootte van de transporten: hoewel de waarden gelijkaardig zijn, is het belangrijk op te merken dat de eerdere meting (Figuur 2) gepresenteerd is in $\text{m}^3/\text{m}/\text{dag}$, terwijl in voorliggend rapport het residueel transport uitgedrukt is in $\text{m}^3/\text{m}/\text{getijcyclus}$. Dit komt neer op een factor 2 verschil tussen beide metingen. De oorzaak van dit verschil is vermoedelijk te vinden in de beschouwde periode: in voorliggend rapport is een analyse uitgevoerd op basis van één springtij (gekenmerkt door grotere transporten), terwijl in de eerdere analyse getallen gepresenteerd worden over een volledige springtij-doottij-cyclus.

Figuur 33 – Afgeleid sedimenttransport op raai 2 (per deelraai van 250 m) o.b.v. volumeverschillen duinen



7 Discussie

7.1 Sedimenttransport

De aanleiding voor deze meetcampagne was het verschil in residueel sedimenttransport langsheen de rand van de Platen van Ossensisse, bepaald op basis van de migratie van de bodemvormen over 2 springtij-doodtij-cycli. Langs de westrand (raai 5) werd op basis van de migratie een sedimenttransport afgeleid van $0,25 - 0,50 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$. Dit komt overeen met $0,19 - 0,38 \text{ t}/\text{getij}/\text{m}$. Langs de oostrand (raai 12) werd op basis van de migratie een sedimenttransport afgeleid van $0,45 - 0,70 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$. Dit komt overeen met $0,35 - 0,54 \text{ t}/\text{getij}/\text{m}$. Wanneer deze transporten vergeleken worden met de residuele transporten op basis van de migratie van bodemvormen over één getijcyclus (springtij), liggen de waardes bepaald over 2 springtij-doodtij-cycli ongeveer een factor 2 lager dan deze op basis van één springtij (13u).

Op basis van de 13u-metingen kunnen eveneens de residuele sedimenttransporten bepaald worden. Omwille van de grotere temporele resolutie is ervoor geopteerd om dit op basis van de ADCP-BS metingen te bepalen. Voor de locatie langs de westrand (Figuur 29) resulteert de integratie over de eb- en vloedfase tot een residueel ("netto", i.e. vloed - ebtransport) transport van $4178 \text{ t}/\text{getij}/\text{m}$ en een bruto (i.e. eb + vloedtransport) transport van $4325 \text{ t}/\text{getij}/\text{m}$. Voor de locatie langs de oostrand (Figuur 28) resulteert de integratie over de eb- en vloedfase tot een residueel ("netto", i.e. vloed - ebtransport) transport van $3892 \text{ t}/\text{getij}/\text{m}$ en een bruto (i.e. eb + vloedtransport) transport van $5324 \text{ t}/\text{getij}/\text{m}$.

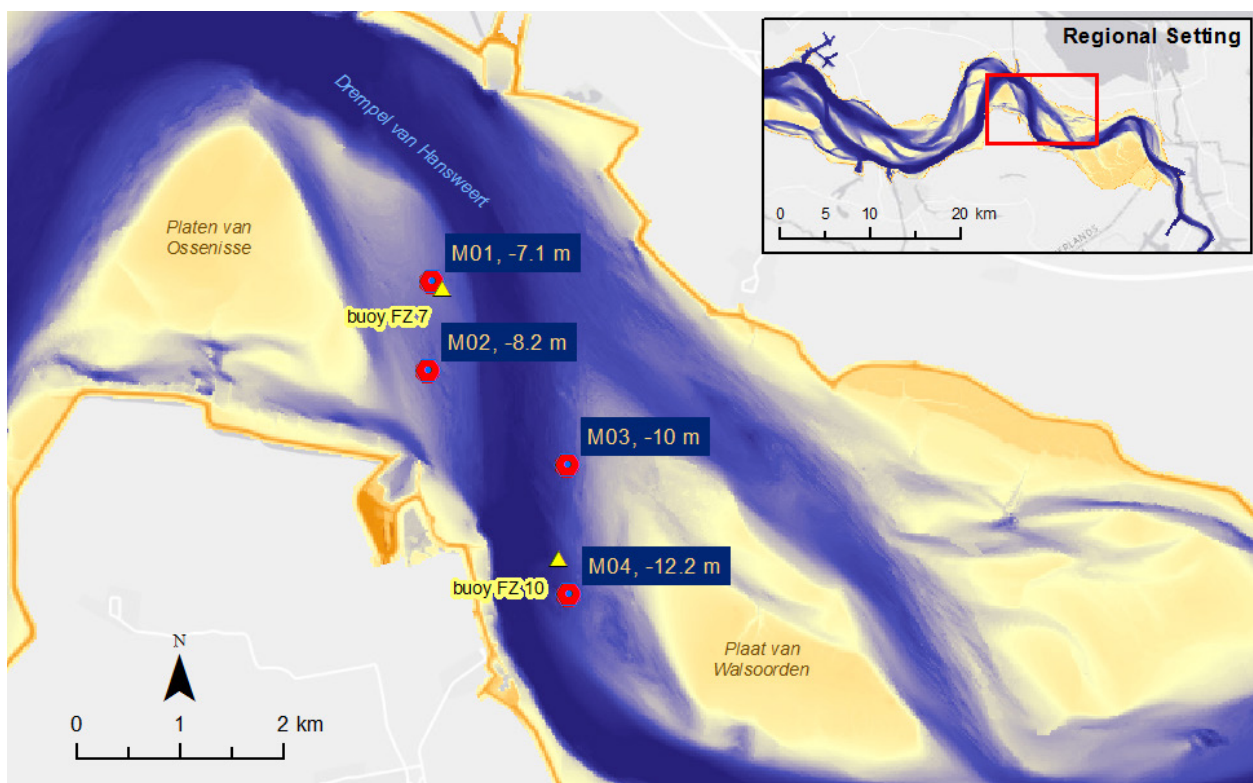
Het valt onmiddellijk op dat de berekende residuele transporten op basis van de migratie van de bodemvormen verschillende grootteordes kleiner zijn dan de residuele totale transporten. Hoewel het niet hoeft te verbazen dat het totale transport aanzienlijk groter is dan het pure bodemtransport (gemeten transporten met de Delftse fles op frame $\sim 0,2 \text{ kg}/\text{m}/\text{s}$ voor een laag van 20 cm boven de bodem \Leftrightarrow totaal transport $\sim 10 \text{ kg}/\text{m}/\text{s}$), is de grootte verhouding opmerkelijk (factor ~ 10000).

Om de representativiteit van deze metingen te toetsen, wordt een vergelijking uitgevoerd met een eerdere meetcampagne uitgevoerd in dezelfde omgeving in april-mei 2016. Op 4 locaties nabij de drempel van Hansweert (Figuur 34) werd gedurende 4 weken met behulp van up-looking ADCP's de waterbeweging en het sedimenttransport (afgeleid uit de ADCP-BS) gemeten. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar (Vandebroek *et al.*, 2017). Figuur 35 geeft het verloop weer van het afgeleide totale sedimenttransport op de verschillende locaties (één locatie (MP03) niet beschikbaar wegens begraving van meetframe) voor een periode gaande van doodtij naar springtij. Figuur 36 geeft het detail van één getijcyclus (7/5/2016 namiddag, bij springtij). Ook voor dit getij werd het residuele sedimenttransport bepaald (Tabel 2). Hieruit blijkt dat het residuele sedimenttransport verschillende grootteordes (factor ~ 1000) groter is dan dit bepaald op basis van de migratie van de bodemvormen. Ten opzichte van de meetcampagne in 2018 liggen de transport een factor 5 à 10 lager. Belangrijk hierbij op te merken is dat de omrekening van de akoestische backscatter bij de meetcampagne in 2018 gebeurd is met stalen die gelijktijdig genomen werden tijdens de meting van de ABS, terwijl dit bij de meetcampagne in 2016 niet het geval was. Hierdoor zit een bijkomende onzekerheid op de sedimenttransport bepaald voor de meetlocaties uit 2016.

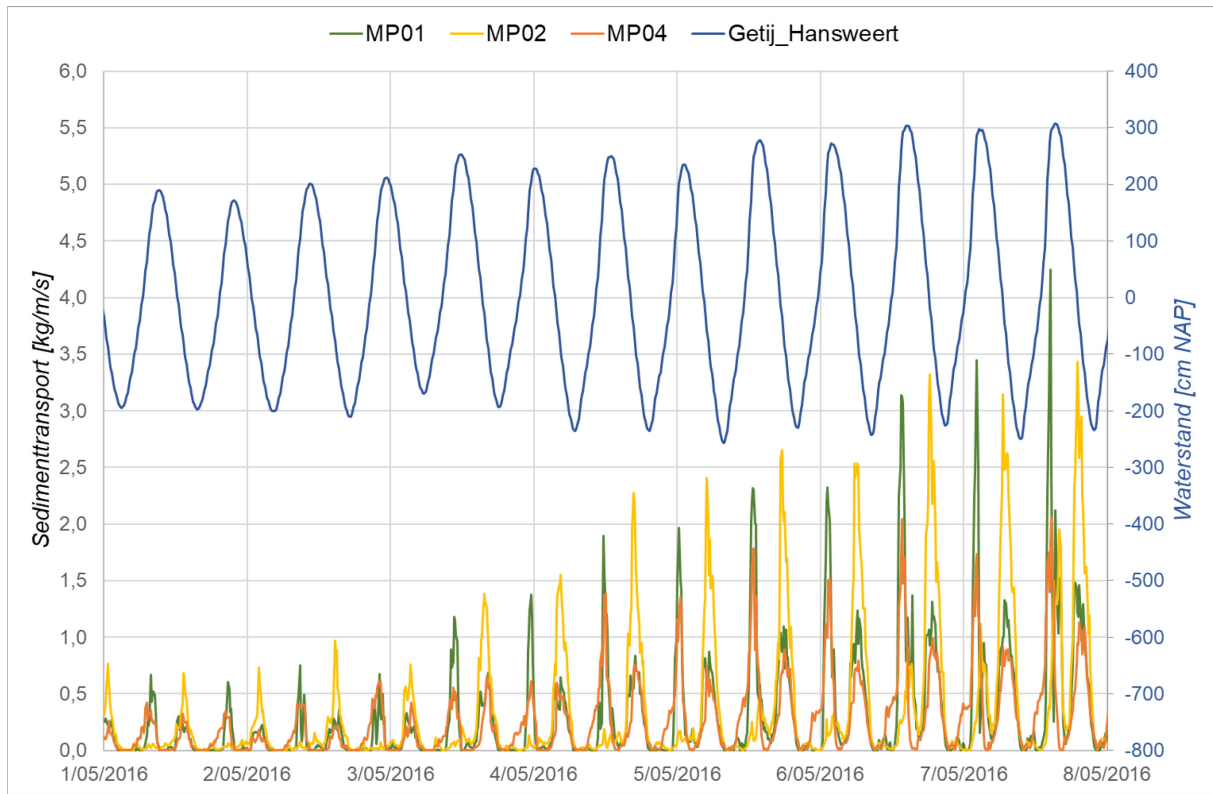
Tabel 2 – Overzicht netto en bruto sedimenttransport

[t/m/getij]	Raai 5	Raai 12	28/8/2018	29/8/2018	MP01	MP02	MP04
Netto	0,19-0,38	0,35-0,54	3892	4178	265	-488	152
Bruto	-	-	5324	4325	1159	1284	817

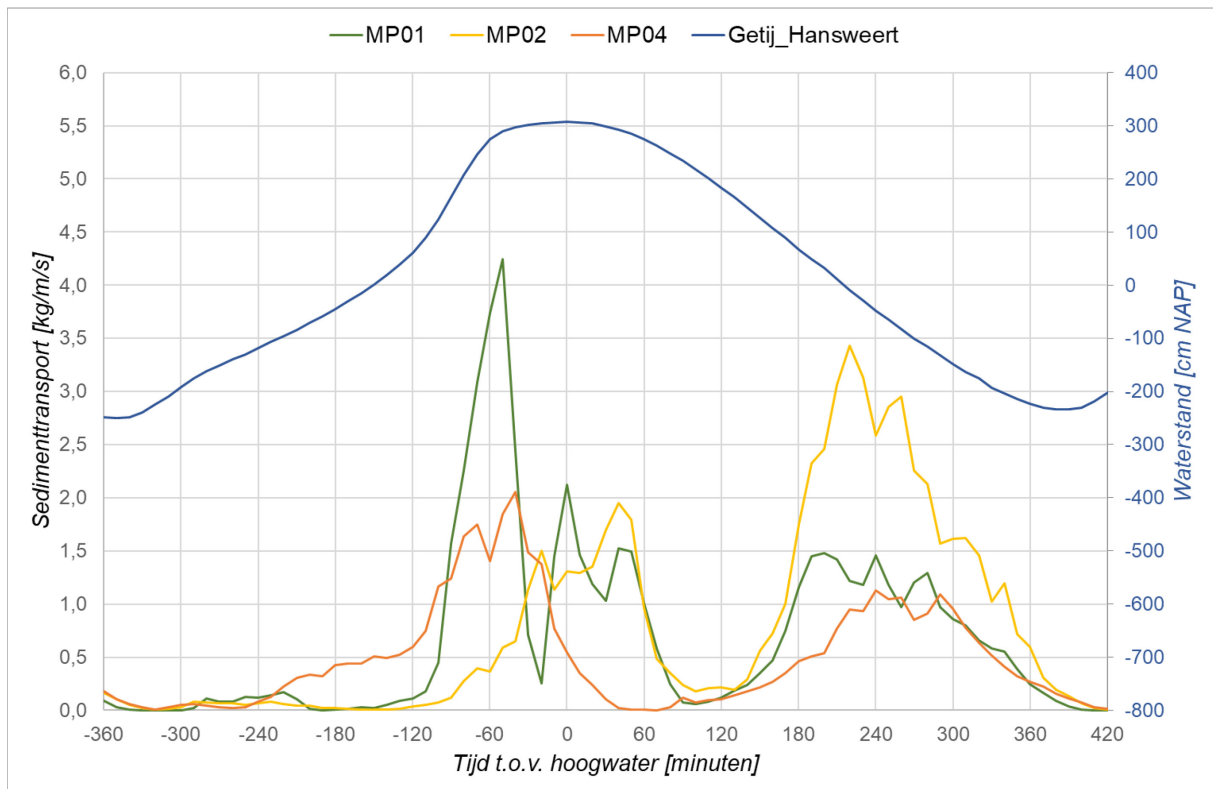
Figuur 34 – Overzicht meetlocaties meetcampagne 2016 (i.s.m. RWS)
Bron: Vandebroek *et al.*, (2017)



Figuur 35 – Verloop sedimenttransport meetcampagne 2016 (deel DT-ST-cyclus)



Figuur 36 – Verloop sedimenttransport meetcampagne 2016 (1 getijcyclus)



7.2 Sedimentverplaatsing

Naast de grootte of intensiteit van het sedimenttransport, is het van belang in te kunnen schatten hoe snel het sediment zich verplaatst. Dit is belangrijk vanuit het oogpunt van de retourstroming: hoe snel zal specie die op een bepaalde locatie gestort wordt zich verplaatsen en uiteindelijk (eventueel) terug op een baggerlocatie terechtkomen?

Om een antwoord te geven op bovenstaande vraag dient een onderscheid gemaakt te worden tussen de verschillende vormen van sedimenttransport (Figuur 37). Het bodemtransport, gedefinieerd als de migratie van de duinen, resulteert in een verplaatsing van bodemsediment over een afstand van ca. 5 m over één getijcyclus (Figuur 38). Aangezien deze migratie een netto resultaat is over één getijfase (hier voornamelijk de vloedfase), komt deze niet noodzakelijk overeen met de afgelegde weg door één sedimentkorrel. Deze afgelegde afstand kan dus als ondergrens beschouwd worden.

Aan de andere kant van het spectrum bevinden zich de sedimentdeeltjes die zich continu in suspensie bevinden, de zogeheten “wash load”. Deze kunnen per getijfase (eb of vloed) een afstand afleggen die overeenkomt met de getijexcursie, dewelke 15 à 20 km bedraagt voor de Schelde (bepaald op basis van vlotteringen in numerieke simulaties). Over één volledige getijcyclus zal de netto afgelegde afstand echter quasi nihil zijn en worden de deeltjes naar de zee getransporteerd. Een parameter die dit beschrijft is de verblijftijd (Vandenbruwaene & Plancke, 2013), die voor het Schelde-estuarium eerdere weken kan bedragen. Aangezien wash load bestaat uit zeer kleine sedimentdeeltjes met lage valsnelheid (klei-partikels), is deze afstand niet representatief voor zandkorrels.

Specifiek voor zandkorrels is het nabij-bodem- en suspensie transport het meest relevant. Op basis van de gemeten stroomsnelheden kan een inschatting gemaakt worden van de afstand die door zandkorrels wordt afgelegd. Belangrijk op te merken is dat zandkorrels pas in beweging komen vanaf een bepaalde stroomsnelheid (“begin van beweging”). Verschillende formules zijn voorhanden om deze kritische snelheid in te schatten; op basis van de formule van Jarocki (Jarocki, 1963) zand met een korrelgrootte van 250 µm bij een waterdiepte van 10 m in beweging komt vanaf een snelheid van 60 cm/s. Het toepassen van deze grenswaarde op de snelheden gemeten met de Aanderaa Seaguard (zie § 4.3.1) resulteert in een beweging van zand enkel in de periode van HW - 120' tot HW. De gemiddelde snelheid over deze periode bedraagt ca. 85 cm/s, wat resulteert in een inschatting van de afgelegde weg van ca. 6,2 km. In de beginfase van de eb, ligt de snelheid gedurende één uur net onder de grenswaarde van 60 cm/s. Indien het zand hierbij zou getransporteerd worden, zou er een afstand van ca. 2,2 km afgelegd worden.

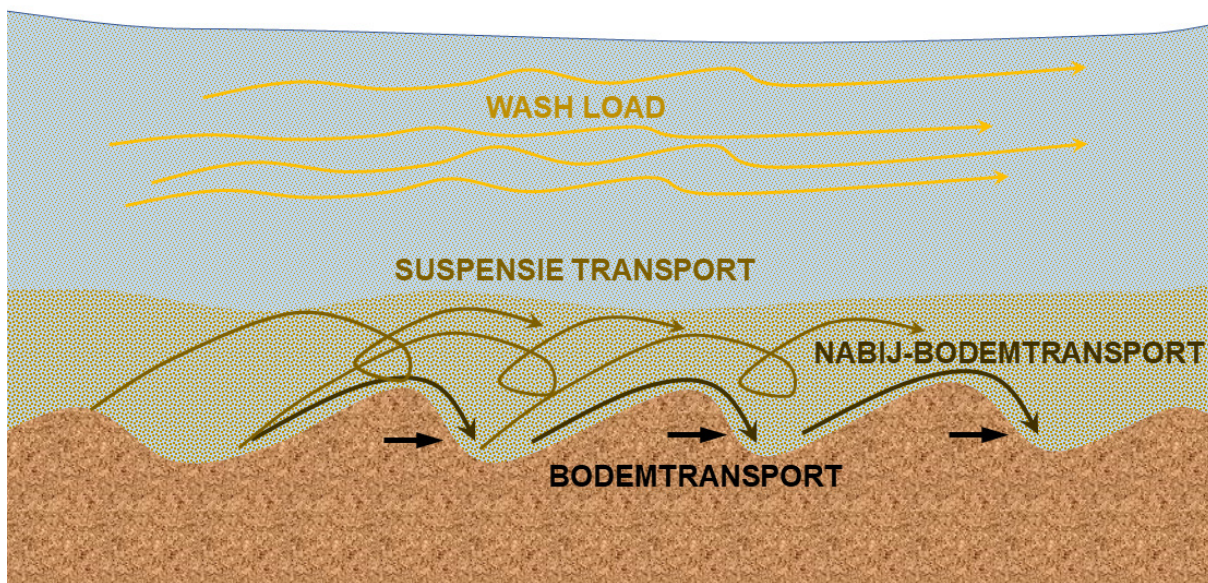
Een overzicht van de verschillende transportafstanden wordt gegeven in Tabel 3.

Hierbij dient opnieuw opgemerkt worden dat deze inschatting locatie-specifiek is en niet kan doorvertaald worden naar andere locaties in de omgeving, laat staan de volledige Westerschelde!

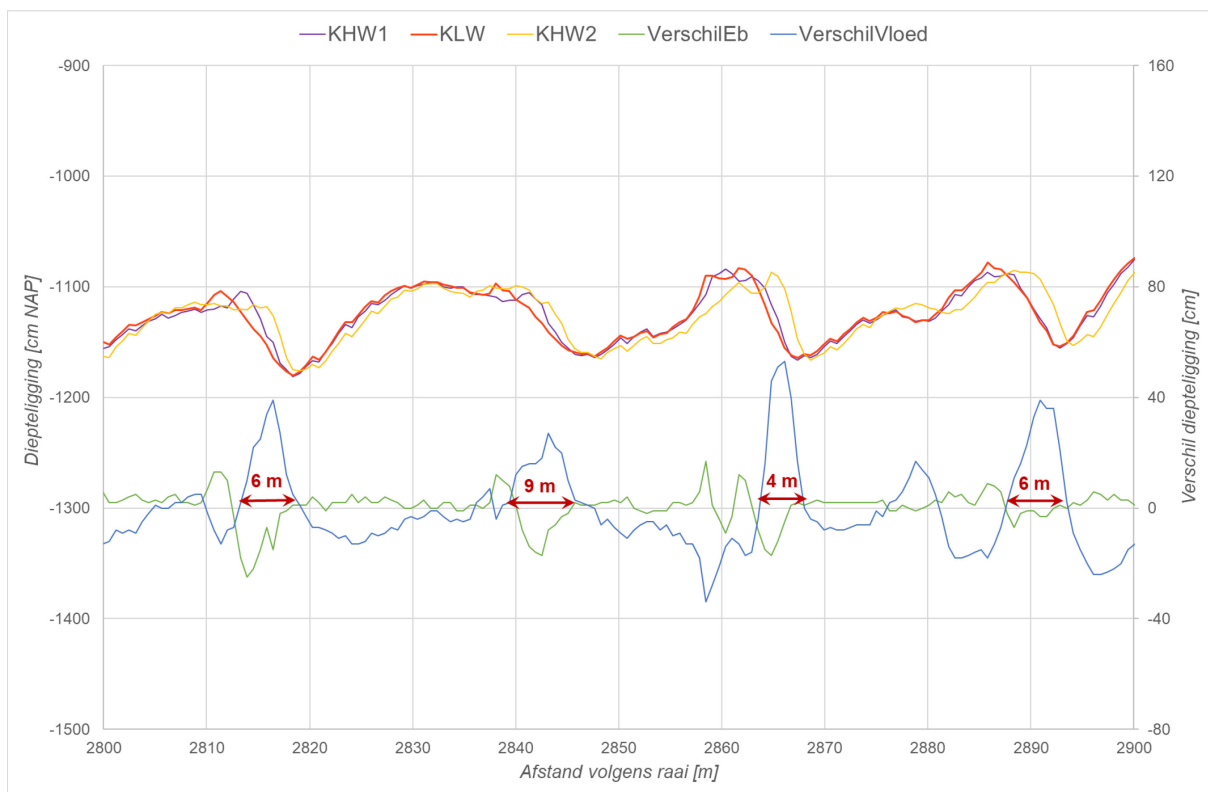
Tabel 3 – Inschatting afgelegde weg sedimentdeeltjes

[m/getij]	Eb	Vloed	Netto
Wash load	15 – 20 km	15 – 20 km	Zeer klein, afhankelijk van stroombaan
Nabij-bodem transport	~ 2 km	~ 6 km	~ 4 km (vloed)
Bodem transport	~ 0 m	~ 5 m	~ 5 m (vloed)

Figuur 37 - Verschillende vormen van sedimenttransport



Figuur 38 – Migratie bodemvormen (1 getijcyclus)



8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Ten behoeve van de invulling van de toekomstige stortstrategie in de Westerschelde is het van groot belang in te kunnen schatten hoe snel en hoeveel de gestorte specie zal getransporteerd worden. Om antwoord te geven op deze kennisvraag, werden door het Waterbouwkundig Laboratorium stromings- en sedimenttransportmetingen uitgevoerd nabij de Platen van Ossensisse, in de onmiddellijke omgeving van de stortlocaties SH41, SH51 (momenteel vergund) en de diepe put van Hansweert (proefstortlocatie).

Beide locaties, zowel langs de westrand als langs de oostrand van het platencomplex, worden gekenmerkt door vloed-dominantie, met stroming die kunnen oplopen tot 2 m/s tijdens de periode van maximum vloedstroming. Gedurende deze periode treden ook de grootste sedimenttransporten op. Tevens treedt een variatie op in het getransporteerde sediment: in de periode van maximum vloed is het vooral (fijn tot matig) zand dat getransporteerd wordt, terwijl in de andere fases van het getij eerder silt, slib en vlokken worden getransporteerd.

De vergelijking tussen de residuele transporten afgeleid uit de migratie van bodemvormen en de totale transport uit deze meetcampagne geven aanleiding tot grote verschillen (tot factor 10000). Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat het sedimenttransport hoofdzakelijk plaatsvindt als suspensie transport, maar aangezien de morfologische veranderingen van de geulen door bodemtransport worden bepaald, het cruciaal is om het (nabij-)bodemtransport in beeld te brengen, terwijl het suspensie transport maar beperkt bijdraagt aan de morfologische veranderingen.

De inschatting van de afgelegde weg van de getransporteerde sedimentdeeltjes voor deze meetlocatie levert een grote range op afhankelijk van de vorm van het sedimenttransport: voor wash load lopen de afstanden op tot 20 km per getijfase, maar de netto afstand zal zeer klein zijn; voor bodemtransport blijven de afstanden beperkt tot enkele meters, waarbij de bestudeerde zone hoofdzakelijk vloed-gedomineerd is; voor het nabij-bodemtransport werd een afstand ingeschat op basis van de snelheden nabij de bodem en een kritische snelheid voor begin van beweging; deze inschatting levert een waarde van 6 km tijdens de vloedfase en 2 km bij de eb fase voor de bemeten locatie.

8.2 Aanbevelingen

Tijdens deze meetcampagne werd gedurende de eerste meetdag uitgebreid gemeten door Rijkswaterstaat, waarbij zowel het sedimenttransport gemeten werd langs de westrand (zelfde locatie als tijdens de tweede meetdag van het WL) als een varende meting gebeurde waarbij zowel met ADCP als multibeam echo-sounder ingezet werden. Het verdient de aanbeveling de resultaten van de extra metingen te vergelijken met deze metingen om een vollediger beeld te krijgen van het sedimenttransport nabij de Platen van Ossensisse.

9 Referenties

- Arcadis.** (2015). PASSENDE BEOORDELING EN NATUURTOETS GEBRUIK PROEFSTORTLO CATIES VAARGEULONDERHOUD WESTERSCHELDE. 148 pp.
- Berben, F.; Brouwer, M.; Kohsiek, L.; Lemkes, J.; Steyaert, F.** (1978). Ribbelvormen, waterbeweging en hun onderlinge samenhang in een getijdengebied (Plaat van Ossensisse, Westerschelde)
- Hertoghs, R.; Vereecken, H.; Boeckx, L.; Deschamps, M.; Mostaert, F.** (2018). Vijfjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: tijdvak 2011-2015. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 16_035_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=295302>
- Jarocki, W.** (1963). A study of sediment. Natural Science Foundation (Warszawa)
- Landers, M.N.; Straub, T.D.; Wood, M.S.; Domanski, M.M.** (2016). Sediment Acoustic Index Method for Computing Continuous Suspended-Sediment Concentrations. *U.S. Geol. Surv. Tech. Methods, B. 3, Chap. C5*. ISBN 9781411340619. 63 pp. Available at: <http://pubs.usgs.gov/tm/03/c05/tm3c5.pdf>
- Lohrmann, A.** (2001). Monitoring Sediment Concentration with acoustic backscattering instruments
- Plancke, Y.; Claeys, S.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Overleg Flexibel Storten: deelrapport 23. Stromingen en sedimentmeting ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 00_031_23. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=289694>
- Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F.** (2018a). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: deelrapport 14. Bodemtransport nabij de Platen van Ossensisse op basis van een analyse van bodemvormen. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 14_024_14. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=301861>
- Plancke, Y.; Paridaens, K.** (2012). Comparison of measurement techniques for monitoring sediment transport under field conditions, in the Scheldt estuary, *in*: (2012). *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2012 Conference (HMEM 2012), Snowbird, Utah, August 12-15, 2012*. American Society of Civil Engineers (ASCE). pp.[1-8]
- Plancke, Y.; Vereecken, H.; Claeys, S.; Mostaert, F.** (2018b). Hydro- en sedimentdynamica in het mondingsgebied van het Schelde-estuarium: deelrapport 1. Factual data rapport frame- en puntmetingen periode augustus 2014. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_083_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://www.vliz.be/nl/open-marien-archief?module=ref&refid=294898>
- Plancke, Y.; Vereecken, H.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2014). Integraal plan Boven-Zeeschelde: deelrapport 3. Factual data-rapport sediment transportmetingen in de Zeeschelde in 2014. *WL Rapporten*, 13_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Sheng, J.; Hay, A.E.** (1988). An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand. *J. Acoust. Soc. Am.* 83(2): 598–610. doi:10.1121/1.396153

Sutherland, T.F.; Lane, P.M.; Amos, C.L.; Downing, J. (2000). The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. *Mar. Geol.* 162(2–4): 587–597. Available at: <https://eprints.soton.ac.uk/12573/>

UNESCO. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater (Unesco technical papers in marine science No. 44)

Urick, R.J. (1983). Principles of Underwater Sound. 3rd ed. Peninsula Pub. ISBN 9780932146625. 444 pp.

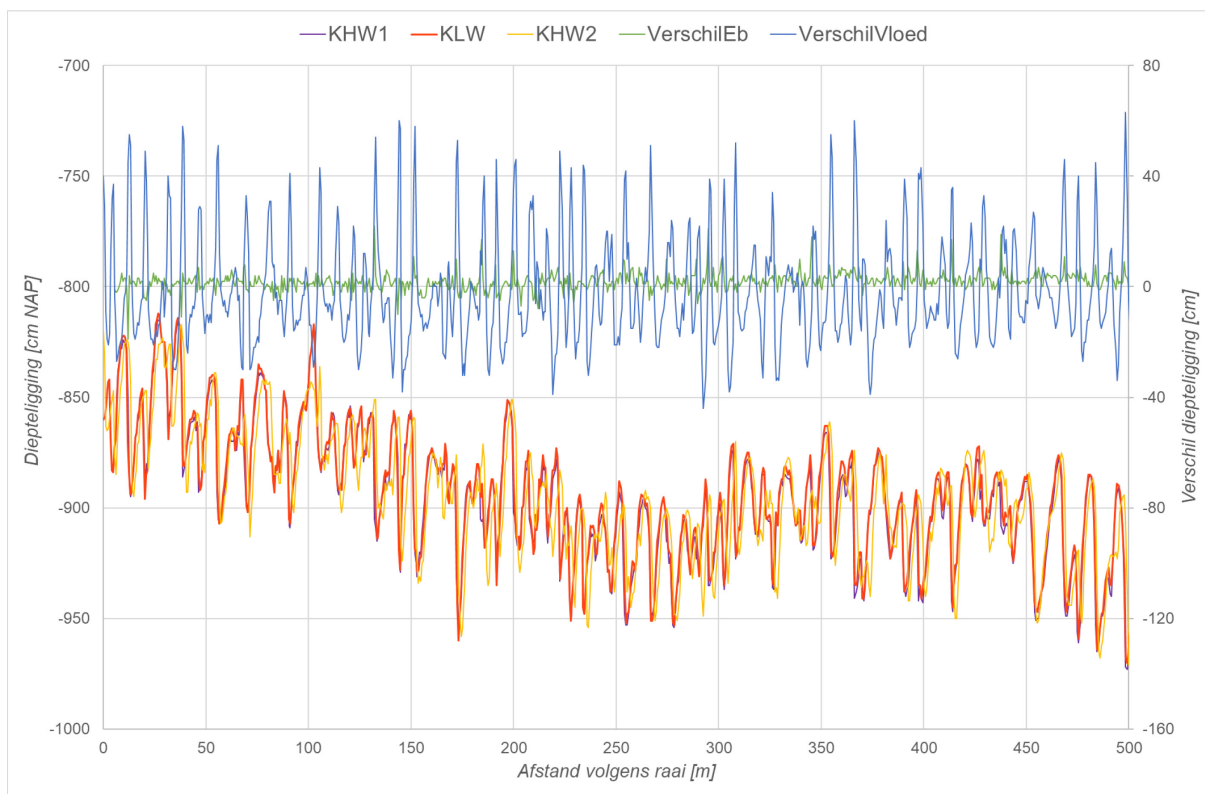
Vandebroek, E.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Agenda for the future – Mesoscale hydro- and sediment dynamics in the Schelde estuary: Sub report 10. Factual data report for measurements at Drempel van Hansweert in April/May 2016. Version 3.. *FHR reports*, 14_024_10. Antea Group: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=289804>

Vandenbruwaene, W.; Plancke, Y. (2013). An interestuarine comparison of hydro- and geomorphodynamics of the TIDE estuaries Schelde, Elbe, Weser and Humber [POSTER]. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

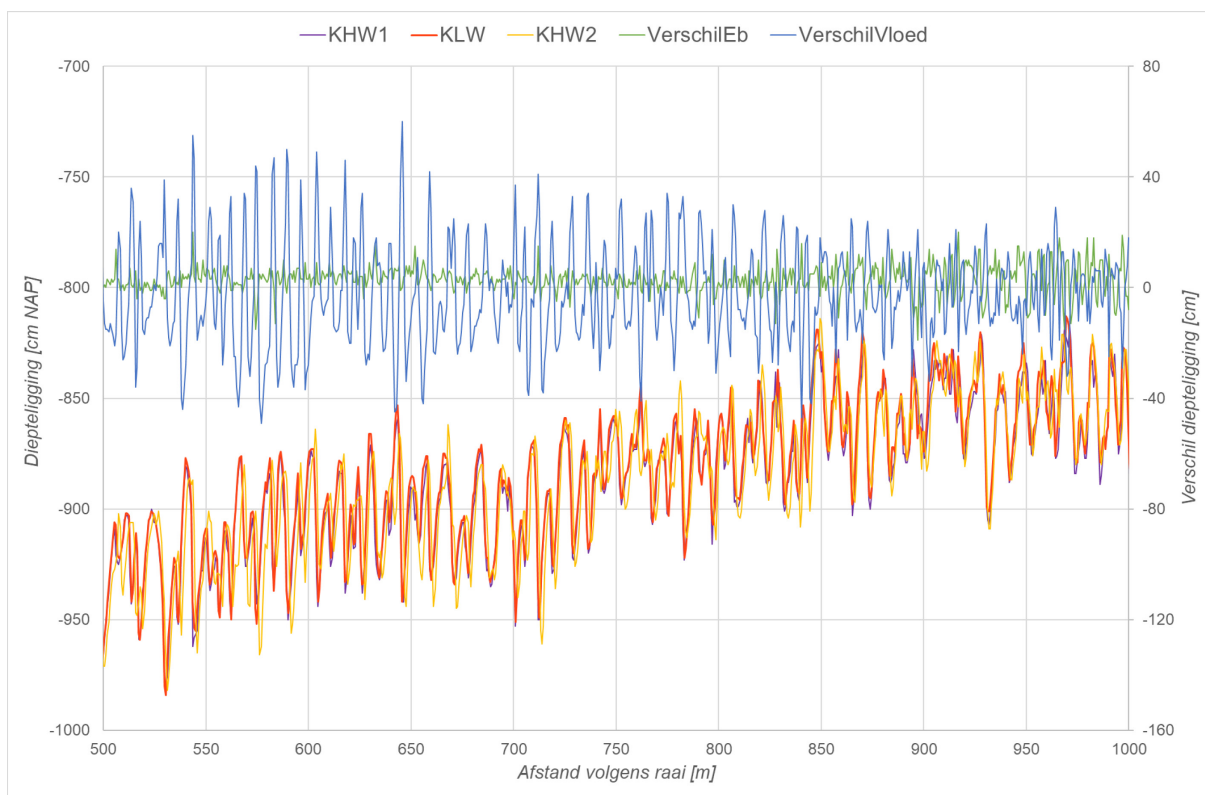
Vanlierde, E.; Michielsen, S.; Vereycken, K.; Hertoghs, R.; Meire, D.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Tienjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: decennium 2001-2010. *WL Rapporten*, 12_071. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage – Bodemvormen

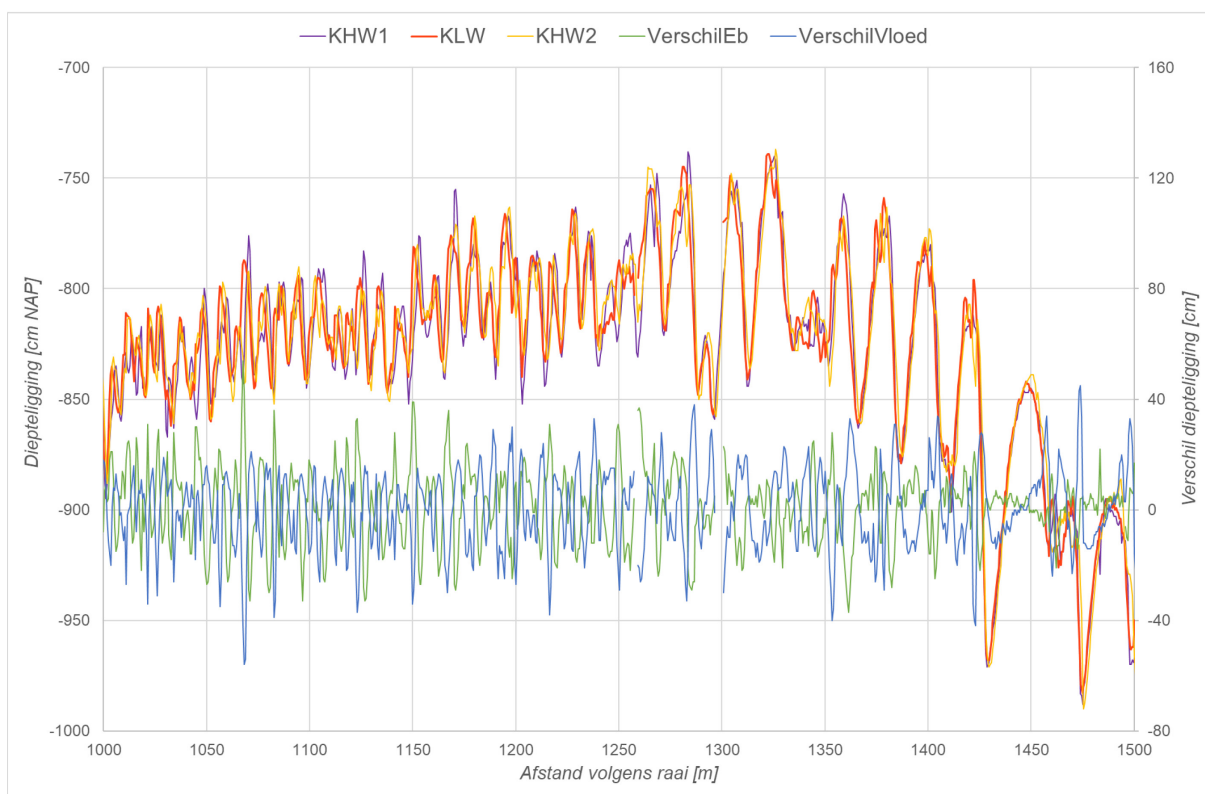
Figuur 39 – Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



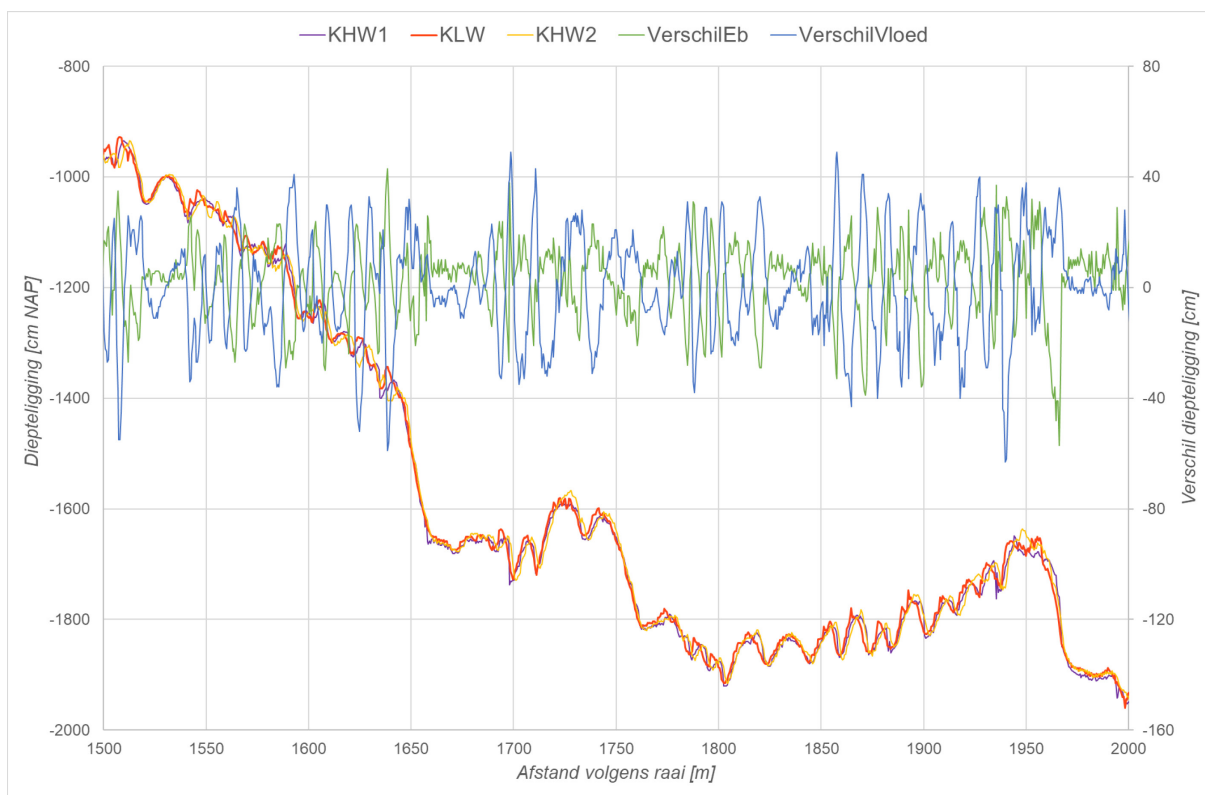
Figuur 40 – Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



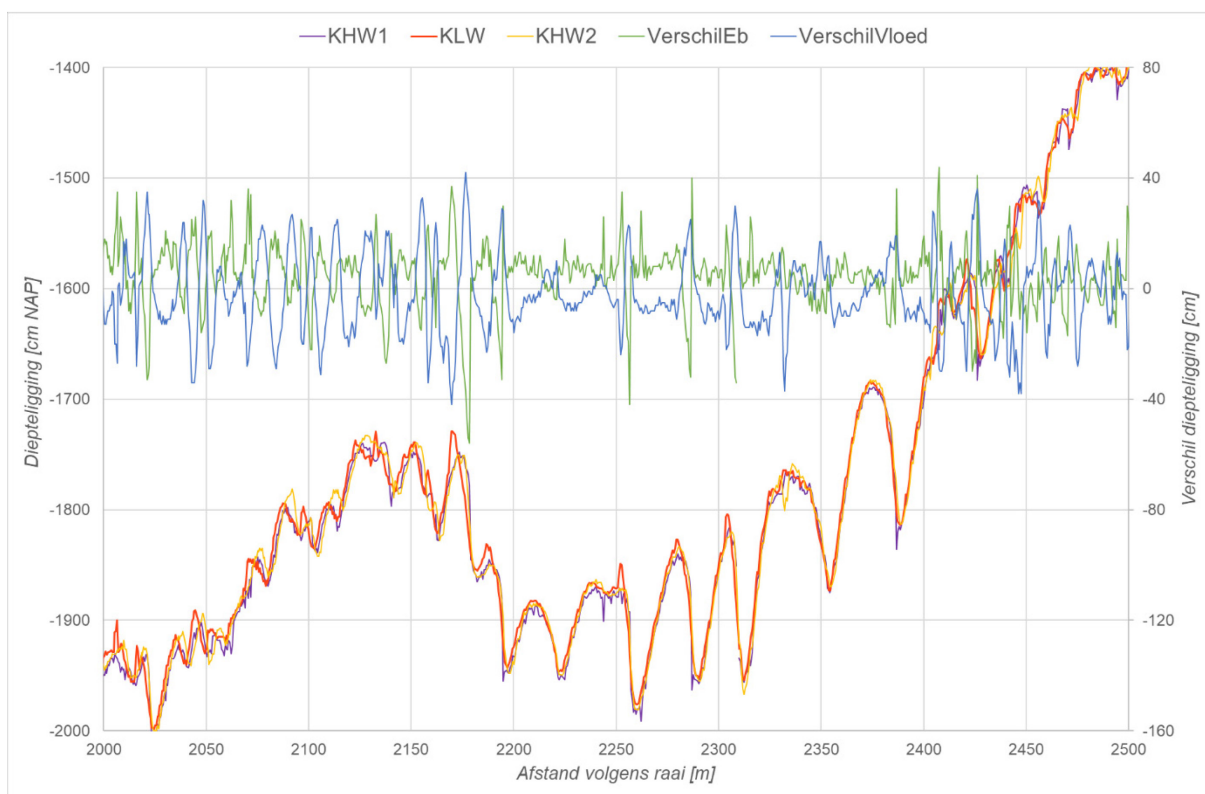
Figuur 41 – Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



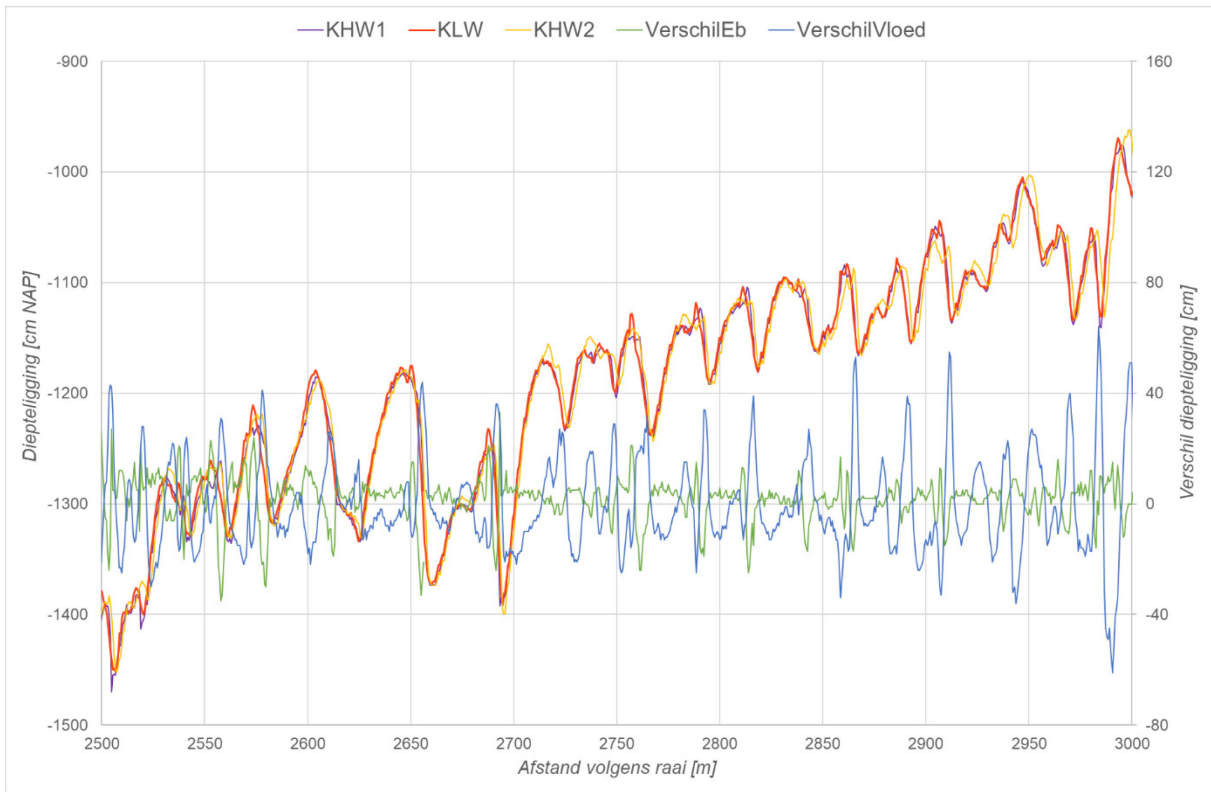
Figuur 42 – Diepteligging raii 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



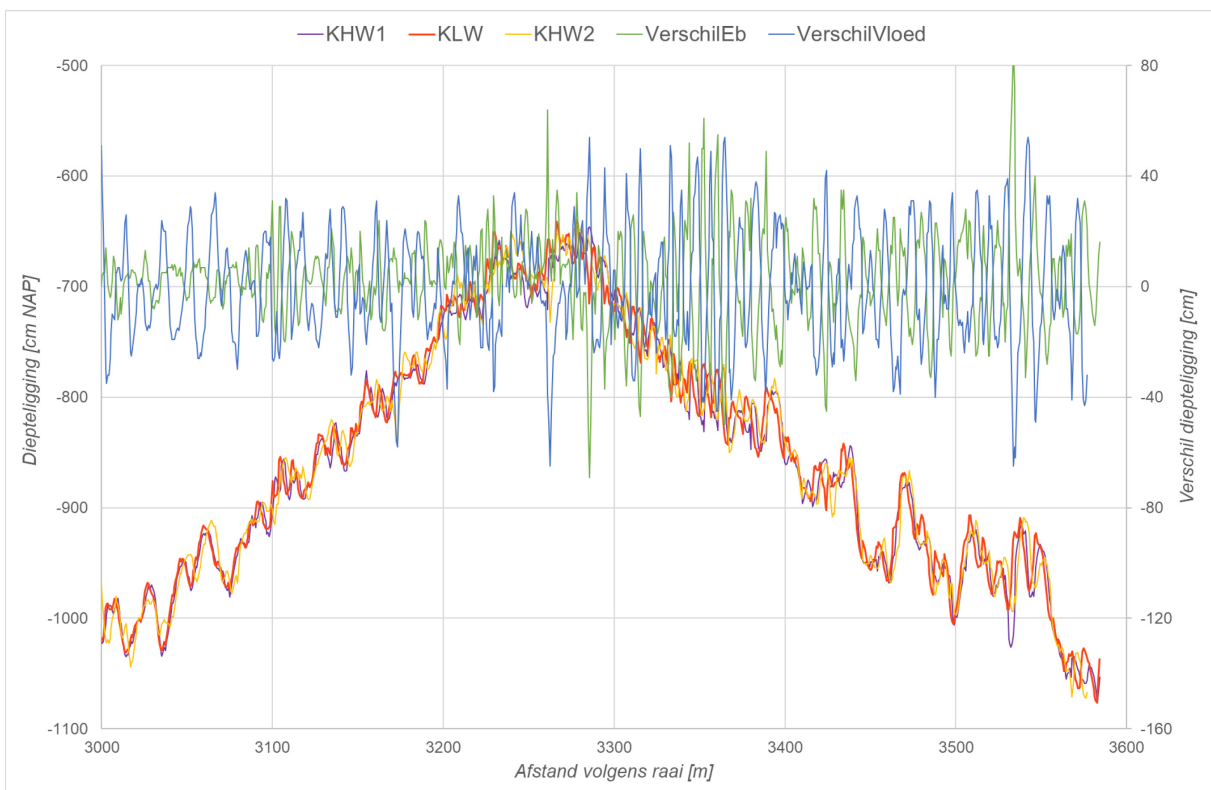
Figuur 43 – Diepteligging raii 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



Figuur 44 – Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



Figuur 45 – Diepteligging raai 2 op 3 momenten tijdens getijcyclus en verschil diepteligging tussen opeenvolgende getijfasen (detail)



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be